Ю. А. Комиссаров
Л. С. Гордеев
Нгуен Суан Нгуен

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Основные процессы химических производств и химическая кибернетика" направления подготовки дипломированных специалистов "Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии"

Москва
« Химия »
2002

УДК 628.179
ББК 35.20
К 63

Рецензенты:
заведующий лабораторией ГУП ГОСНИИ Синтезбелок докт. техн. наук, проф. А.Ю. Винаров; заведующий кафедрой водоснабжения Московского государственного строительного университета докт. техн. наук, проф. М.А. Сомов

Комиссаров Ю.А. и др.
К63 **Анализ и синтез систем водообеспечения химических производств**: Учеб. пособие для вузов / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Нгуен Суан Нгуен – М.: Химия., 2002. – 496 с.

ISBN 5–7245–1085–5

Рассмотрены основные принципы создания замкнутых систем водообеспечения химических производств. Приведены математические модели биохимической очистки сточных вод, методов очистки и структуры построения оптимальных технологических схем. Даны сравнительные показатели очистки сточных вод с применением традиционных и современных методов мембранных технологий.

Для студентов, специализирующихся в области математического моделирования, ресурсосбережения и водообеспечения химических производств, а также для аспирантов и инженеров-технологов, занятых проектированием систем водообеспечения.

УДК 628.179
ББК 35.20

Yu.A.Komissarov, L.S.Gordeev, Nguyen Xuan Nguyen
Water supply for chemical industries.

Fundamental principles of creation of water supply closed loop systems of chemical plants were considered. The mathematical models of wastewater biological treatment, treatment methods and construction structures of optimal technological schemes were presented. Comparative indices of wastewater treatment by using the traditional and modern membrane technologies were given.

The book is intended for students specialized in the field of mathematical modeling, resourcesaving and water supply of chemical plants, as well as for post-graduate students and processing engineers specialised in water supply system design.

ISBN 5–7245–1085–5

© Комиссаров Ю. А., Гордеев Л. С., Нгуен Суан Нгуен, 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие. 7

Глава 1. Сточные воды химических предприятий. Общая характеристика..... 10

Глава 2. Замкнутые системы водного хозяйства 20
2 1. Основные принципы создания замкнутых систем 22
2.2. Утилизация сточных вод химических предприятий 31
2.3 Прогнозирование развития замкнутых систем. 42

Глава 3. Очистка сточных вод и пути ее реализации.. 45
3 1 Анализ существующих схем очистки сточных вод 45
3.2 Основные принципы биохимической очистки 53
3 2.1 Роль микроорганизмов... 54
3 2 2. Способы реализации биологической очистки 56
3 3 Интенсификация работы очистных сооружений . . 74
3 4 Анализ конструктивного оформления элементов очистных сооружений и методов их расчета. 77
3 4.1. Аэортенки.. .. ..
3 4 2. Отстойники 83
3.4.3 Усреднители, смесители, камеры хлопьеобразования.. 92

Глава 4. Математическое моделирование процесса биохимической очистки сточных вод
4.1. Математическое моделирование аэротенка 96
4.1.1. Математическая модель продольного перемешивания в ограниченном канале с несколькими зонами смешения 97
4.1.2. Экспериментальные исследования гидродинамики в аэротенке .. . 101
4.1.3. Гидродинамическая модель аэротенка..... 106
4.1.4. Кинетика процесса изъятия субстрата микроорганизмами . . 117
4.2 Математическая модель процесса очистки сточных вод биофильтрами 122
4 3 Математическая модель биохимического реактора аэробной ферментации.. 124
4 4 Полная математическая модель биореактора . . 130
4.5 Определение концентрации микроорганизмов, фиксированных на носителе 136
4 6. Эрлифтный биореактор с плавающей насадкой и фиксированными на ней микроорганизмами..... 139
4.6.1. Результаты эксперимента и их обработка .. .. .141
4 6.2 Результаты моделирования.. 141
4 7. Математическая модель процесса осаждения 145

4.8. Математическая модель процесса биологической очистки сточных вод.. 150
4 9. Математическое моделирование процесса хлопьеобразования . .154
4 10 Организация потоков в аэротенках биологической очистки сточных вод. 161

4 10 1 Сосредоточенная подача сточной воды и активного ила 161
4 10 2. Равномерно рассредоточенная подача сточной воды при сосредоточенной подаче активного ила 162
4 10 3 Неравномерно рассредоточенная подача сточной воды при сосредоточенной подаче активного ила 164

Глава 5. Разработка математических моделей оптимальных схем очистки сточных вод

5.1. Система классификации сточных вод 168
5.2 Алгоритм выбора метода очистки по системе классификации сточных вод... 176
5.3. Выбор методов очистки и их взаимного расположения в технологической схеме водоочискти..... 177
5.4. Формирование технологической схемы очистки 184
5 5. Критерий оценик выбора оптимальной схемы очистки .. 187
5 6 Многоуровневый метод синтеза оптимальных схем биологической очистки сточных вод .. 190
5 6 1. Формализация задачи синтеза. 190
5 6 2 Анализ подходов при решении задачи синтеза 193
Подходы к решению задачи оптимизации 195
Подходы к решению задачи расчета стационарного режима 197
5 6 3 Многоуровневая процедура решения задачи синтеза 200
5 6 4 Разработка метода синтеза 202
Синтез с использованием структурных параметров первого рода 202
Синтез с использованием структурных параметров второго рода 206
Модифицированный метод структурных параметров..... 208
Алгоритм ветвления метода ветвей и границ.. 210
5.6 5. Разработка подходов, методов оптимизации и расчета биотехнологических систем 214
Выбор поисковых переменных..... 215
Рекомендации по выбору поисковых переменных 217
"Полуаналитический" метод расчета градиента критерия по поисковым переменным 222
Квазиньютоновский метод расчета материальных и тепловых балансов с блочной аппроксимацией. 228
5 6 6 Разработка многоуровневого метода анализа, оптимизации, синтеза биотехнологических систем 230
Выбор критерия эффективности многоуровневого метода 230
Принципы сопряжения многоуровневых методов 231
Построение многоуровневого метода 234
5 6 7 Задача структурно-параметрической оптимизации технологической схемы БОСВ 239
Описание критерия, поисковых переменных и ограничений 239
Анализ оптимальной схемы на структурную устойчивость 245

Глава 6. Подготовка сточных для повторного использования

6 1 Запасы пресных вод и потребление их в промышленности 247
6 2 Требования к воде, используемой в технологических процессах 249

6.3 Требования к качеству воды, используемой в оборотных системах водоснабжения..... 255
6 4. Способы обработки сточных вод при создании замкнутых систем водообеспечения. 264
6 5 Корректировка минерального состава очищенных сточных вод 267
6 6 Борьба с биологическими обрастаниями оборотных систем 274
6 7 Оценка выгодности повторного использования воды 277
6 8 Условия выбора схем водообеспечения 279
6 9 Имитационное моделирование формирования качества сточных вод 281

Глава 7. Охлаждение оборотной воды

7 1 Системы охлаждения оборотной воды 294
7 2 Интенсификация процессов охлаждения воды 304
7 3. Эжекционные охладители 314
7.4 Сдвоенные теплообменные аппараты. 327

Глава 8. Очистка и использование поверхностного стока

8.1. Особенности формирования поверхностного стока 341
8.2. Отведение и очистка поверхностного стока.... 345

Глава 9. Контроль загрязнения водной среды сточными водами
КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ

9 1.Оценка состояния контролируемой среды 358
9 2.Математическое моделирование распространения примесей в водных средах.... 364
9 3 Прогнозирование состояния объектов водных сред .. 381
9 4.Оценка состояния контролируемого объекта . 387
9 5 Оценка качества принятого решения . 389
9 6 Идентификация источников аварийных сбросов в объекты водных сред. 392
9 7 Расчет предельно допустимых сбросов 407

Глава 10. Очистка сточных вод с использованием мембран

10.1 Баромембранные процессы..... 409
10 2 Механизмы переноса веществ через полупроницаемые мембраны 411
10.3 Мембраны для баромембранных процессов 416
10 3 1 Полимерные мембраны 417
Пористые мембраны.. . 420
Диффузионные мембраны.. 426
10 3 2 Динамические мембраны. 427
10.3 3 Неорганические мембраны 432
Технология нанесения мембранных покрытий 435
10 4 Аппараты и установки для баромембранных процессов 436
10 5 Очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий 440
10 5 1 Общая характеристика стоков и основные методы их очистки 440
10 5 2 Применение мембранных установок в целлюлозно-бумажной промышленности 442

10 6 Опытные установки для исследования мембран . . 446
10 7 Расчет технологических параметров мембранных установок для очистки и концентрирования сточных вод .. 450

Глава 11. Замкнутые системы водного хозяйства

11 1 Замкнутая система водного хозяйства Первомайского промышленного узла. 457
11 2. Примеры схем использования воды в замкнутых системах 462
11 3 Автоматизированная система управления в промышленном водообеспечении.... 473
11.4 Модели систем водообеспечения промышленных предприятий 479
11 5. Разработка замкнутой системы водообеспечения Калушского промышленного узла (Украина)..... 483
11.6. Эколого-экономическая эффективность водопользования... 489
11.6.1. Экономический ущерб от загрязнения водных ресурсов.. 490
11.6.2. Стимулирование водоохранной деятельности. 491

Рекомендуемая литература. 492

«Вода – бóльший дефицит, чем энергия. У нас есть альтернативные источники энергии, но альтернативы воде нет»

Юджин Одум

ПРЕДИСЛОВИЕ

Химические и смежные отрасли промышленности являются одними из самых водоемких, одновременно предприятия этих отраслей являются интенсивнейшими "генераторами" загрязнения сточных вод, что обусловливает необходимость резкого сокращения промышленных сточных вод, поступающих в водные объекты

Мировой объем сточных вод исчисляется многими тысячами кубометров и достигает 20% и более от объема годового стока рек в некоторые моря. По ряду данных промышленные стоки добавляют к естественному речному выносу 12-13- кратное количество свинца, цинка и меди, 30- кратное количество сурьмы. По сведению ЮНЕСКО ежегодно с водами рек в моря выносятся свыше 320 млн тонн соединений железа, 2,3 млн. тонн соединений свинца, 6,5 млн тонн соединений фосфора Наблюдения за самоочищением некоторых рек индустриальных районов показали, что оно обеспечивает нейтрализацию лишь 1/3 поступающих загрязнений

В качестве иллюстрации несовершенства существующих систем обработки отходов промышленных предприятий можно привести такие цифры. В водные объекты России в составе сточных вод только в 1997 г сброшено (тыс тонн)· 618,6 - взвешенных веществ; 19,2 - железа, 9,3 - нефтепродуктов; 4,0 - синтетических поверхностно-активных веществ; 0,76 - цинка и других ингредиентов ,0,2 - соединений меди

При проектировании систем водообеспечения химических производств возникают проблемы выбора оптимального оборудования, технологической схемы водоочистки, ее структуры, методов очистки и т д

Из сказанного ясно, сколь велика роль мероприятий, направленных на оздоровление окружающей среды, наиболее прогрессивными среди которых является создание безотходных и безводных технологических процессов, использование мембранных методов очистки сточных вод и т д Для реализации вышеуказанных проблем, целью которых является минимальный сброс в водные объекты загрязняющих веществ с промышленными сточными водами, необходимо разрабатывать и поэтапно внедрять основные принципы системы автоматизированного проектирования промышленного водообеспечения с использованием современных методов математического моделирования и системного анализа, а также замкнутых систем водопользования

Под замкнутой понимают такую систему водного хозяйства, которая позволяет использовать все отработанные воды в производстве повторно или многократно без очистки,либо после соответствующей очист-

ки, полностью исключающей сброс производственных сточных вод в водные объекты Создание таких систем позволяет не только предотвратить загрязнение окружающей среды, но и решить следующие важные задачи

– резко сократить промышленное потребление свежей воды и использовать ее только для хозяйственно-питьевых целей и восполнения потерь в оборотных системах,

– существенно снизить, или даже исключить потери ценного сырья и материалов со сточными водами

Доля интенсивных мероприятий в обеспечении потребности в воде не превышает 15%, что существенно ниже среднего уровня всего водопотребления Перестройка структуры инвестирования привела бы к ощутимым позитивным сдвигам Например, целесообразно наращивать затраты на создание водооборотных и замкнутых систем В настоящее время они на 35% обеспечивают удовлетворение потребности в воде, в то время как, по расчетам авторов, на их долю приходится только около 6-8% стоимости основных фондов водохозяйственного назначения

Говоря о различных формах и методах интенсификации водного хозяйства химической и смежных отраслей промышленности, можно выделить два основных положения

1) оптимизация водохозяйственных балансов за счет более эффективного использования забираемой воды и, как следствие, снижение водоемкости общественного производства,

2) минимизация материально-трудовых ресурсов, необходимых для обеспечения водохозяйственного баланса, на базе увеличения производительности труда, снижения фондоемкости водообеспечения, повышения эффективности использования природных факторов

В химической и смежных отраслях промышленности процесс интенсификации водопользования имеет свою специфику различаются формы и методы обеспечения рационального использования воды конкретными потребителями, мероприятия по ее экономии, а также меры по сокращению материальных и трудовых затрат на обеспечение водой

В ближайшие годы предстоит провести широкомасштабные работы по организации охраны водных ресурсов страны от истощения и загрязнения. В связи с этим большое значение приобретает. использование современных методов математического моделирования и системного анализа для выбора оптимальных режимных и конструктивных параметров и схем очистки, реализация замкнутых безотходных систем водоснабжения, использование мембранных методов очистки и современного оборудования Создание замкнутых систем водоснабжения позволит защитить водные объекты от загрязнения и засоления, значительно сократить объемы забираемой из них свежей воды, что приобретает особо важное значение для тех районов, где испытывается дефицит в пресной воде

В предлагаемом учебном пособии авторы рассматривают вопросы очистки вод, оборотных систем водоснабжения, при этом основное внимание уделяется специфике функционирования химических производств

применительно к решению задач, связанных с созданием бессбросных систем технического водообеспечения

Поскольку состав сточных вод различных предприятий и загрязнений, встречающихся в этих водах, весьма разнообразен и различны также требования к их кондиционированию перед повторным использованием, описать все возможные схемы создания таких систем не представляется возможным Поэтому авторы ограничиваются описанием общих методов и приемов осуществления и технико-экономической оценки замкнутых систем водного хозяйства химических и смежных с ним предприятий

В данном издании использованы материалы учебного пособия Гордеева Л.С., Беличенко Ю.П., Комиссарова Ю А "Замкнутые системы водообеспечения химических производств"(М ·Химия, 1996 272с), которые дополнены исследованиями по математическому моделированию гидродинамики и кинетики биохимической очистки сточных вод, хлопьеобразования и т.д ; выбору оптимальных схем водоочистки, прогнозу и оценке состояния контролируемого объекта – водной среды и качества принятого решения, использованию мембранных методов очистки сточных вод

Авторы выражают благодарность кандидатам технических наук Рафкату Абдулхаевичу Кантюкову и Сергею Владимировичу Николаеву за поддержку и активное участие при написании рукописи, а также рецензентам за ценные замечания и внимание, проявленное при подготовке рукописи к изданию

Гордеев Л С написал главы 4,5,9 и 10 Нгуен Суан Нгуен – главы 4, 6 и 8 Комиссаров Ю А. написал главы 1 5,7. 11 и осуществил общее редактирование издания.

Предлагаемое учебное пособие будет полезным для студентов и аспирантов высших учебных заведений по специальностям "Основные процессы химических производств и химическая кибернетика", "Защита окружающей среды", "Водоснабжение и водоотделение"

Авторы надеются, что это издание позволит в дальнейшем уточнять и развивать поднятые в нем вопросы рационального использования водных ресурсов регионов и России в целом Авторы также с большой благодарностью примут все замечания и пожелания читателей, которые просим направлять по адресу 125047, Москва, Миусская пл , 9, Российский химико-технологический университет им Д И Менделеева

Авторы

Глава 1

Сточные воды химических предприятий. Общая характеристика.

Классификация сточных вод. Сточные воды, образующиеся на промышленных предприятиях, а также отводимые с их территории по составу можно разделить на три категории

производственные (использованные в технологическом процессе производства или образующиеся при добыче полезных ископаемых),

бытовые (от санитарных узлов производственных и непроизводственных корпусов и зданий, а также от душевых установок, имеющихся на территории предприятия),

атмосферные (дождевые и образующиеся от таяния снега)

В свою очередь, производственные сточные воды можно подразделить на два основных вида загрязненные и не загрязненные

З а г р я з н е н н ы е производственные сточные воды могут содержать преимущественно органические либо минеральные примеси По содержанию примесей (в мг/л) производственные сточные воды подразделяют на четыре группы от 1 до 500, 500-5000, 5000-30 000, более 30 000

Производственные сточные воды можно различать также по физическим свойствам, например, по температуре кипения кипящие при температуре ниже 120 °С, при 120-250 °С и выше 250 °С (в зависимости от состава примесей) По степени агрессивности сточные воды могут быть слабоагрессивными (слабокислые с pH 6-6,5 и слабощелочные с pH 8-9), сильноагрессивными (сильнокислые с pH < 6 и сильнощелочные с pH > 9) и неагрессивными (с pH 6,5-8).

Н е з а г р я з н е н н ы е производственные сточные воды поступают от холодильных, компрессорных, теплообменных аппаратов Кроме того, они образуются при охлаждении технологического оборудования и продуктов производства.

На различных предприятиях даже при одинаковых технологических процессах состав производственных сточных вод, режим водоотведения и удельный расход неодинаковы

Формирование и анализ сточных вод Состав производственных сточных вод во многом зависит от вида перерабатываемого сырья Так, в сточных водах нефтеперерабатывающих предприятий основным загрязняющим компонентом является нефть На состав сточных вод влияет также характер технологического процесса, состав исходных компонентов, промежуточных продуктов, выпускаемых продуктов, состав исходной воды, а также местные условия и другие факторы

Для разработки рациональной схемы водоотведения и оценки возможности повторного использования производственных сточных вод изучают их состав и режим водоотведения, анализируют физико-химические показатели сточных вод и режим поступления в канализационную сеть не

только общего стока промышленного предприятия, но и сточных вод от отдельных цехов, а при необходимости — и от отдельных аппаратов

Для анализируемых сточных вод необходимо определять следующие характеристики. содержание компонентов, специфичных для данного производства (фенолы, нефтепродукты, поверхностно-активные, ядовитые, радиоактивные, взрывоопасные вещества), общее количество органических веществ, выражаемое в $БПК_{полн}$ (двадцатисуточная биохимическая потребность воды в кислороде) и ХПК (химическая потребность воды в кислороде), интенсивность окраски, степень минерализации, кинетику оседания или всплывания механических примесей и их объем, коагулируемость стока и др Качественная характеристика производственных сточных вод важна для выбора метода их очистки, контроля за сбросом и эксплуатацией очистных сооружений, а также для решения вопросов о возможности их повторного использования, извлечения и утилизации веществ, загрязняющих воду

Необходимое условие получения надежных и достоверных результатов анализа – правильный отбор проб По способу отбора различают *средние*, *среднепропорциональные* и *разовые* пробы В зависимости от режима работы предприятия *средние* пробы могут быть сменными и суточными Их отбирают равными порциями (обычно через 20-30 мин) в течение смены и через 1-2 ч в течение суток. *Среднепропорциональные* пробы также могут быть сменными и суточными Их отбирают порциями, пропорциональными расходу сточных вод в данный период времени *Разовые* пробы отбирают на анализ при залповых сбросах сточных вод, а также при проведении исследований и наладочных работ.

Место и периодичность отбора проб зависят от цели анализа При проектировании систем водоотведения промышленных предприятий необходимо иметь не только общий анализ сточных вод предприятия, но и анализ основных цеховых сточных вод. Для того чтобы разработать рациональную схему отведения и обработки всех производственных сточных вод, в анализах должен быть достаточно полно указан состав загрязнений

Для отбора проб промышленных сточных вод применяют как автоматические, так и ручные пробоотборники Наиболее точно оценить качество воды позволяет автоматический пробоотборник, который улавливает все изменения состава сточной воды, связанные с залповыми и случайными поступлениями загрязнений, нарушением режима очистки и т п

При исследовании сточных вод химических предприятий следует руководствоваться схемой, приведенной на рис 1 1 Сначала (этап I) определяют общие показатели загрязненности сточных вод (органолептические и физико-химические), затем содержание органических и неорганических примесей, а также растворенных газов (этап II), при наличии в сточной воде коллоидных, мелко- и грубодисперсных примесей определяют их количество и свойства (этап III) Кроме того, определяют объем, влажность и другие свойства осадка, образующегося после отделения (отстаивания, фильтрования, центрифугирования и др) грубодисперсных примесей Исследуют характерные свойства осадков· слеживаемость, уплотняемость, налипаемость, коагулируемость, всплываемость примесей, поверхностное натяжение на границе жидкость–газ, вязкость, электропроводность и

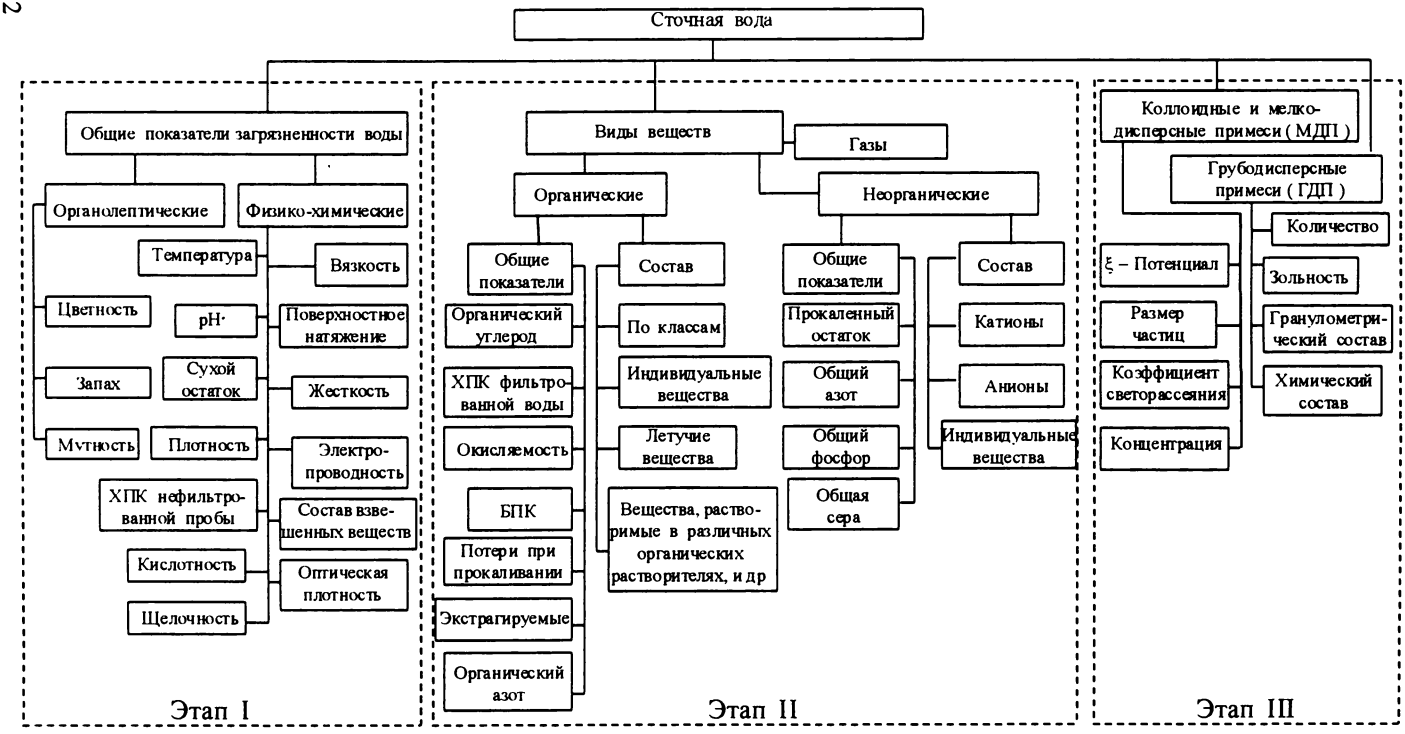


Рис 1 1 Показатели. определяемые при исследовании производственных сточных вод (см пояснения в тексте)

другие показатели, позволяющие комплексно оценить свойства отдельных загрязнений и воды в целом

Состав производственных сточных вод отдельных предприятий колеблется в широких пределах, поэтому выбор оптимального метода очистки для каждого вида производственных сточных вод должен быть тщательно обоснован

В состав продукции вода входит лишь в некоторых технологических процессах и в сравнительно небольших количествах На большинстве предприятий воду используют, как правило, для вспомогательных целей

Значительная часть воды (на отдельных производствах до 70-90%) расходуется на охлаждение продуктов в теплообменных аппаратах, для транспортирования и поглощения растворенных или нерастворенных (минеральных и органических) примесей, в качестве растворителя реагентов или среды, где происходят физико-химические превращения; для промывки промежуточной и готовой продукции.

Использование воды в системах производственного водоснабжения и нормы водопотребления. В соответствии с назначением воду в системах производственного водообеспечения разделяют на четыре категории

вода I категории используется для охлаждения жидких и конденсации газообразных продуктов в теплообменных аппаратах; при этом вода не контактирует с продуктом, а лишь нагревается и практически не загрязняется, возможны лишь аварийные утечки жидких и газообразных продуктов, загрязняющие воду, при неисправных теплообменных аппаратах,

вода II категории служит в качестве среды, поглощающей различные нерастворимые (механические) и растворенные примеси, вода не нагревается (обогащение полезных ископаемых, гидротранспорт), но загрязняется механическими и растворенными примесями,

вода III категории используется так же, как и вода II категории, но подвергается нагреву (улавливание и очистка газов в скрубберах, гашение кокса и т. п),

вода IV категории служит в качестве экстрагента и растворителя реагентов (например, при флотационном обогащении природных ископаемых)

Количество и состав производственных сточных вод в значительной степени определяется системой водообеспечения чем больше воды оборотного цикла используется для технологических целей на данном или соседнем предприятии, тем меньше абсолютное количество сточных вод и тем больше загрязнений в них содержится Количество производственных сточных вод зависит от производительности предприятия в соответствии с укрупненными нормами водопотребления и водоотведения, установленными для различных отраслей промышленности

Нормой водопотребления считается целесообразное количество воды, необходимое для производственного процесса, установленное (или рекомендуемое) на основании передового опыта или научно обоснованного расчета

Укрупненная норма водопотребления учитывает все расходы воды на предприятии производственные, хозяйственно-питьевые, бытовые и т п

Норма водоотведения – это установленное среднее количество сточных вод, отводимых от производства в водоем, при целесообразной норме водопотребления. Укрупненная норма водоотведения включает в себя количество выпускаемых в водоем сточных вод очищенных производственных и бытовых, производственных, не требующих очистки, фильтрационных из прудов-осветлителей, хвостохранилищ и шламонакопителей

Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения выражают в кубических метрах воды на единицу готовой продукции или используемого сырья Эти нормы расхода производственных сточных вод применяют при проектировании вновь строящихся и реконструируемых предприятий Укрупненные нормы позволяют оценить рациональность использования воды и на действующих объектах

Расчетный расход образующихся производственных сточных вод $Q'_{сут}$ ($м^3$/сут) и $q_{max\,с}$ (л/с) определяют по формулам

$$Q'_{сут} = NM;\ q_{max\,с} = [NM_{max\,см}/(T \times 3{,}6)]K_ч,$$

где N – норма водоотведения на единицу продукции или перерабатываемого сырья с учетом оборота воды, $м^3$, M и $M_{max\,см}$ – число единиц продукции или перерабатываемого сырья соответственно в течение 1 сут и 1 смены с максимальной выработкой, T – продолжительность смены, ч, $K_ч$ – коэффициент часовой неравномерности

Если на предприятии есть производства, выпускающие различную продукцию, то необходимо определять количество сточных вод для каждого производства и для предприятия в целом

$$\Sigma Q'_{сут} = N_1M_1 + N_2M_2 + \ldots + N_nM_n,$$

где N_1, N_2, , N_n – нормы водоотведения на единицу продукции или перерабатываемого сырья на отдельных производствах, M_1, M_2, , M_n – число единиц продукции или перерабатываемого сырья на отдельных производствах за 1 сут

В ряде случаев необходимо определять количество сточных вод, сбрасываемых аппаратами и образующихся при отдельных операциях, а также количество сточных вод, различающихся по характеру и концентрации загрязнений

Расчетные суточные, часовые и секундные расходы бытовых сточных вод на промышленных предприятиях определяют по смене с максимальным числом работающих людей (учитывая продолжительность смены) по следующим формулам

$$Q'_{сут} = (25n_1 + 45n_2)/1000;$$

$$Q'_{max\,ч} = (25n_3K_{ч1} + 45n_4K_{ч2})/(T \times 1000);$$

$$q_{max\,с} = (25n_3K_{ч1} + 45n_4K_{ч2})/(T \times 3600),$$

где n_1 и n_2 – число работающих в течение 1 сут в цехах при нормах водоотведения соответственно 25 и 45 л на 1 человека (холодные и горячие цехи), n_3 и n_4 – максимальное число работающих в смену при тех же нормах водоотведения, $K_{ч1}$ и $K_{ч2}$ – коэффициенты часовой неравномерности, соответствующие тем же нормам водоотведения и равные 3 и 2.5

Расчетные расходы дождевых вод определяют в зависимости от местных условий – местонахождения предприятия, рельефа местности и степени благоустройства территории

Оценка ущерба от загрязнения водных объектов сточными водами. Загрязнение природных вод наносит огромный ущерб, как природе, так и экономике страны Загрязненные водоисточники становятся лишь ограниченно пригодными, а во многих случаях и совершенно непригодными для хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, орошения сельскохозяйственных угодий, рыбного хозяйства Загрязненные реки и водоемы нельзя использовать для водных видов спорта и отдыха, они нередко становятся источниками инфекционных заболеваний По данным Всемирной организации здравоохранения при ООН, по этой причине ежегодно заболевают до 500 млн человек (около 15% населения Земли)

Примеси, поступающие в водные объекты со сточными водами химических предприятий, можно подразделить на минеральные, органические, биологические

К минеральным загрязнениям относятся песок, глина, зола и шлаки, растворы и эмульсии солей, кислот, щелочей и минеральных масел, другие неорганические соединения Они ухудшают физико-химические и органолептические свойства воды, отравляют фауну водоемов Менее опасны минеральные загрязнения без специфического токсического действия взвешенные частицы песка, глины, других пород,но и они ухудшают свойства воды и способствуют заиливанию водоемов

Весьма неблагоприятное воздействие на водоемы и водотоки оказывают сточные воды, содержащие значительные количества ртути и мышьяка Они поступают с предприятий, производящих пестициды, и с некоторых других производств. Сильными токсическими свойствами обладают соединения ртути и кадмия. Многие составляющие промышленных стоков вообще не поддаются разложению под действием биохимических процессов, протекающих в водоемах, и накапливаются в них, вызывая резкие изменения состава и свойств природных вод, а нерастворимые в воде отходы ряда химических производств легко проникают в биологические системы и накапливаются в трофических цепях

К органическим загрязнениям относятся смолы, фенолы, красители, спирты, альдегиды, нафтеновые кислоты, серо- и хлорсодержащие органические соединения, различные пестициды, смываемые в водоемы с сельскохозяйственных угодий, синтетические поверхностно-активные вещества и др

На поверхностные и подземные воды отрицательно влияют нефть и нефтепродукты. На поверхности рек и водоемов образуются пленки, а на дне – отложения Даже при незначительном (0,2-0,4 мг/л) содержании нефти вода приобретает специфический запах, который не исчезает после хлорирования и фильтрования Присутствие нефтепродуктов особенно пагубно для рыб Наличие в воде более 0,1 мг/л нефти придает мясу рыб не устраняемые никакой технологической обработкой привкус и специфический запах

Большую опасность представляют фенольные соединения, содержащиеся в сточных водах предприятий лесохимической, коксохимической,

сланцевой, анилинокрасочной промышленности, а также различных заводов, вырабатывающих вещества для химической обработки сельскохозяйственного сырья Обладая сильными антисептическими свойствами, эти соединения нарушают биологические процессы в водоемах, вода приобретает резкий неприятный запах, ухудшаются условия для воспроизводства рыбы

В последние годы наблюдается загрязнение природных вод синтетическими поверхностно-активными веществами (ПАВ), которые содержатся в сточных водах некоторых производств ПАВ придают воде привкусы и запахи, образуют стойкие скопления пены, снижают способность воды к биохимической очистке. Даже при небольших концентрациях ПАВ в воде прекращается рост какой бы то ни было растительности

Выпуск в природные водоемы *теплых вод от различных энергетических установок* усиливает испарение, сопровождающееся увеличением минерализации воды Это приводит к уменьшению количества растворенного кислорода в воде, что отрицательно влияет на растительность и живые организмы

Наибольшую опасность для природных вод, здоровья людей, обитания животных и рыб представляют различные *радиоактивные отходы.* Мелкие организмы, усваивающие эти вещества в небольших дозах, поглощаются более крупными, в которых радиоактивные элементы накапливаются до опасных концентраций. Именно поэтому отдельные особи пресноводных рыб оказывается во много раз «радиоактивнее» той водной среды, в которой они обитают.

Биологические загрязнения – это болезнетворные бактерии и вирусы, возбудители инфекций; они попадают в водоемы с бытовыми сточными водами, а также со сточными водами некоторых производств (главным образом химических). Использование такой воды в качестве питьевой и для бытовых нужд провоцирует серьезные заболевания· холеру, инфекционный гепатит, дизентерию, брюшной тиф, заражение различными видами гельминтов (гельминтоз) и т.д

Соотношение между отдельными видами загрязняющих примесей в различных водоемах зависит от объемов и специфики поступающих в них сточных вод, характера и степени загрязненности атмосферы и проводимых воздухо- и водоохранных мероприятий

Под *ущербом от загрязнения водных источников* следует понимать потери трудовых затрат и материальных ресурсов, связанные с ликвидацией последствий загрязнения различными водопользователями, а также ухудшение социально-гигиенических условий для населения

В коммунальном, промышленном и сельскохозяйственном водоснабжении ухудшение качества забираемых вод приводит к дополнительным затратам (перенос водозабора, строительство более сложных систем и установок для очистки воды, строительство систем водоснабжения из других источников и др.). Непроизводительные затраты на очистку загрязненной воды и транспортирование чистой воды на большие расстояния возрастают с каждым годом.

В химической промышленности использование воды из загрязненных водоемов без предварительной ее очистки отрицательно сказывается на

качестве продукции уменьшаются стойкость и прочность получаемых материалов, изменяется окраска изделий, кроме того, снижается мощность технологического оборудования, нарушается нормальный теплообмен, усиливается коррозия металла и т д

В рыбном хозяйстве из-за загрязнения природных вод гибнет рыба, ухудшаются ее товарные качества, уменьшается продуктивность водоемов и т д При загрязнении водных источников сокращаются сроки службы подводных частей сооружений водозаборов, речных портов, гидроэлектростанций, плотин

Оценка ущерба. Методические подходы для определения ущерба, наносимого различными отраслями народного хозяйства вследствие сброса в водные объекты загрязненных сточных вод, положены в основу «Методики подсчета убытков, причиненных государству нарушением водного законодательства» (РД 33-5 3 01–83), которую широко применяют на практике Охарактеризуем кратко различные виды ущерба

Социально-гигиенический ущерб При оценке учитывают потери, возникающие от снижения оздоровительной, спортивной и эстетической ценности водных источников (поддающейся денежной оценке) Ущерб от загрязнения водных источников, наносимый промышленным предприятиям, коммунальному хозяйству, другим водопотребителям, осуществляющим различные мероприятия по восстановлению качества воды (ущерб $У_1$), рассчитывают по формуле

$$У_1 = \sum_{i=1}^{i=n} m_i W_i (C + E_н K)_i ,$$

где m_i – число однотипных первых водопотребителей, W_i – объем водопотребления первым водопотребителем, м^3/год; $(C + E_н K)$ – дополнительные удельные приведенные затраты i-го водопотребителя, связанные с загрязнением водного источника, руб/м^3, n – число различных водопотребителей

Рыбное хозяйство. Ущерб от загрязнения водных источников (в стоимостной форме) определяют в соответствии с затратами на компенсацию потерь рыбы и рыбных запасов или с затратами на мероприятия по восстановлению качества воды источника до принятого эталона «чистой» воды и восстановлению рыбопродуктивности данного водоема В расчетах предусматривают все возможные варианты воспроизводства (восстановления) утраченных рыбных запасов в данном или других районах Если снижение рыбопродуктивности от загрязнения произошло в водном источнике, где ведется не промысловый, а только потребительский или спортивный лов, ущерб определяют на основе данных о рыбном промысле в аналогичных водных источниках с учетом вида встречающейся в нем рыбы.

Сельское хозяйство. Ущерб может проявляться в виде дополнительных затрат на получение воды требуемого качества. В этом случае его определяют по формуле, приведенной выше В тех случаях, когда для орошаемого земледелия используют воду худшего качества (по сравнению с принятым эталоном качества воды незагрязненного источника), ущерб рассчи-

тывают по затратам на воспроизводство потерянной продукции, а также на восстановление плодородия почв

Водопотребители, осуществляющие различные мероприятия для восстановления потерянной продукции. Этот вид ущерба (ущерб $У_2$) рассчитывают по формуле

$$У_2 = P(C_2 - C_1 + E_н \Delta K) + \Delta P(C_3 - C_1 + E_н K) + E_н K_0,$$

где P – годовое производство продукции, т; C_1 – текущие затраты на производство продукции в незагрязненном водном источнике, руб/т; C_2 – текущие затраты на производство продукции в (при) загрязненном водном источнике, руб/т; $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; ΔK – увеличение отдельных капитальных вложений по водопотребителям при загрязненном водном источнике, руб/т; ΔP – снижение годового производства продукции при зарязненном водном источнике, т, C_3 – текущие затраты на продукцию, используемую для возмещения ее потерь при загрязненном водном источнике, руб/т; K – капитальные вложения на восстановление продукции при загрязненном водном источнике руб/т, K_0 – остаточная балансовая стоимость основных фондов, не используемых в результате уменьшения производства продукции при загрязненном водном источнике, руб/т

Соприкосновение различных объектов (сооружений, оборудования, земли и др) *с загрязненной водой* (ущерб $У_3$) Этот вид ущерба рассчитывают на основе приведенных затрат на мероприятия по восстановлению вышедших из строя объектов или на предотвращение их порчи

$$У_3 = \sum_{i=1}^{i=S} (C + E_н K)_i,$$

где S – число объектов; $C + E_н K$ – приведенные затраты i-го объекта, связанные с его восстановлением (предотвращением порчи), руб/т.

Население. Ущерб, причиняемый населению, определяется затратами на ликвидацию причин, вызывающих негативные последствия для людей Так, при загрязнении мест для купания ущерб равен сумме затрат на сооружение бассейнов для купания, затрат на очистку и обезвреживание воды в них и т д Если вблизи загрязненных источников расположены дома отдыха, санатории, базы отдыха, то может возникнуть необходимость в затратах на перенос этих здравниц в другие места

Загрязнение водных источников губительно влияет на окружающую природную среду в целом причиняется вред лесным массивам, ценным диким животным При этом ущерб определяют по затратам на их воспроизводство

Ущерб, наносимый народному хозяйству от загрязнения водных источников, можно рассчитывать по отдельным водопотребителям и водопотребляющим отраслям, по отдельным водным бассейнам или их участкам, по административным районам, республикам и по стране в целом Исходная информация для расчета ущерба содержит.

- карту-схему рассматриваемого объекта (бассейн или участок бассейна реки, административный район и др.) с размещением всех водопотребите-

лей (промышленных объектов, населенных пунктов, строительных и обводнительных систем и др),

– характеристику загрязненности используемых водных источников на расчетный год оценки ущерба до и после сброса, сточных вод (при необходимости более точного расчета ущерба данные о качестве воды берут по месяцам),

– данные о водопотреблении, в том числе: используемый источник, требования, предъявляемые к качеству воды, дальность расположения водопотребителей от загрязненных водных источников; объем потребляемой воды каждым водопотребителем в сутки и по каждому месяцу расчетного года;

– данные о влиянии загрязнения водных источников на водопотребителей и окружающую природную среду.

Общий ущерб У, наносимый региону от загрязнения водных источников, представляет собой сумму ущербов, наносимых отдельным водопотребителям (промышленным предприятиям, сельскому хозяйству и др). Его рассчитывают по формуле

$$У = \sum_{i=1}^{m} W_i^n З_i^n + \sum_{j=1}^{l} W_j^{к/х} З_j^{к/х} + \sum_{k=1}^{e} W_k^{с/х} З_k^{с/х} + \sum_{\alpha=1}^{r} P_a З_a^p + \sum_{\beta=1}^{c} B_\beta З_\beta^в + У_р,$$

где W_i, W_j, W_k – объем водопотребления, м^3; P_α – объем воспроизводимой продукции, ц, B_β – площадь водного источника, восстановленного по качеству воды в источнике, км^2, m, l, e, r, c – число однотипных водопотребителей по отраслям; n, $к/х$, $с/х$, $р$, $в$ – соответственно промышленность, коммунальное хозяйство, сельское хозяйство, рыбное хозяйство, водный источник; $З_i$, $З_j$, $З_k$, $З_\alpha$, $З_\beta$ – дополнительные затраты на единицу потребляемой воды, или на единицу воспроизводимой продукции, или на единицу восстановления качества воды в водном источнике, руб/м^3, руб/км^3; $У_р$ – любой другой выявленный вид ущерба от загрязнения водных источников (затраты на перенос здравниц, сооружение бассейнов для купания и т.д.).

Оценка перечисленных показателей ущерба от загрязнения водных источников позволяет более убедительно обосновать с экономических позиций целесообразность создания замкнутых систем водоснабжения.

Глава 2

Замкнутые системы водного хозяйства

Охрана рек от загрязнения сточными водами базируется на необходимости соблюдения в заданных створах предельно допустимых концентраций различных веществ, при превышении которых вода становится непригодной для использования. До последнего времени основное внимание при решении этой проблемы было сосредоточено на очистке сточных вод перед сбросом в водные объекты Однако экономически целесообразные технологические процессы обезвреживания сточных вод обеспечивают в лучшем случае удаление 90-95% органических веществ, неорганических – 20-40% и практически не снижают содержание в них солей. Последнее обстоятельство означает, что в местах сброса сточных вод, вплоть до расчетных створов водопользования, на водотоках образуются неблагоприятные в экологическом отношении зоны В условиях роста производства и соответствующего увеличения объемов сточных вод возрастает потребность в свежей воде для разбавления, чтобы сделать их безопасными для людей, животных и всех объектов окружающей среды Особенно опасны сбросы в водоемы остаточных количеств токсичных веществ, в том числе канцерогенных Следует учитывать и тот факт, что в природных условиях малотоксичные и даже нетоксичные соединения могут превращаться в токсичные.

Среди водорастворимых канцерогенных веществ прежде всего надо назвать нитрозоимины – промежуточные продукты синтеза красителей, различных гетероциклических соединений, аминокислот и некоторых других веществ Нитрозоимины широко применяют в качестве растворителей, для получения гербицидов и т д , что свидетельствует о возможности их поступления в производственные сточные, а затем – в поверхностные или подземные воды Эти соединения могут образовываться при взаимодействии нитритов и кислот со вторичными и третичными аминами, а также с гетероциклическими соединениями как во внешней среде (при смешении промышленных стоков, в состав которых входят необходимые компоненты), так и в организме человека и животных Канцерогенные нитрозоимины были обнаружены в желудке крыс, которые получали с пищей вторичные амины, а с питьевой водой – нитриты Предполагают, что кислотная среда желудочного сока животных и человека благоприятна для образования нитрозоиминов из вторичных аминов и нитритов, что может стать причиной заболевания раком

Радикальным решением проблемы охраны природных ресурсов, в том числе и водной среды, является создание и внедрение в промышленность безотходных и безводных технологических процессов По существу, безотходная технология представляет собой соблюдение организационно-технических мероприятий, обеспечивающих комплексное использование сырья и энергии

Если идеальная модель безотходного производства не может быть по

каким-либо причинам реализована в полной мере, то такая технология носит название малоотходной Важно отметить, что отходы – это, по сути, сырье, которое может быть использовано для получения полезной продукции В связи с этим необходимы новые критерии оценки создаваемых технологических процессов Ранее при определении степени прогрессивности технологии в качестве решающих факторов принимались технические и экономические, теперь же основным должен стать экологический фактор Для ряда промышленных производств уже имеются технические решения, позволяющие создать безотходные и безводные технологии Однако, несмотря на определенные достижения в совершенствовании технологии производства на отдельных предприятиях, в целом проблема охраны окружающей среды разработана недостаточно, и для массовой замены существующих технологий безотходными потребуются огромные инвестиции Поэтому совершенно очевидно, что в ближайшие как минимум два-три десятилетия подавляющая часть предприятий будет работать, попрежнему расходуя большие количества воды

Отработанные воды можно отнести к основным отходам большинства предприятий Действующие системы очистки обеспечивают сбор, транспортирование и только затем соответствующую очистку вод При этом происходит неизбежное смешивание различных веществ, иногда близких по свойствам, а часто и совершенно различных, что значительно усложняет выделение ценных компонентов и очистку воды до необходимой степени, а иногда вообще не позволяет решить эту задачу

Во многих случаях со сточными водами предприятий в водные объекты поступают десятки и даже сотни веществ с одним и тем же лимитирующим признаком вредности, так что их действие оказывается аддитивным Поэтому эффективность очистки сточных вод должна быть такой, чтобы остаточное содержание загрязнений было во много раз меньше существующих предельно допустимых концентраций, а это неизбежно связано с большими капитальными и эксплуатационными затратами

Современные очистные сооружения промышленных объектов химической промышленности, основанные на традиционных методах механической, химической и биологической очистки, не обеспечивают снижение солесодержания в сточных водах, а в некоторых случаях оно даже повышается В то же время и организация водооборота на этих объектах приводит к постепенному росту минерализации циркулирующей воды Поэтому развитие систем оборотного и последовательного использования воды хотя и способствует резкому, примерно в 20-25 раз, уменьшению объемов водопотребления и водоотведения, но все же не исключает, как правило, сброса в водные объекты засоленных, так называемых продувочных вод

Чтобы полностью исключить сброс в водоемы загрязняющих веществ, необходимо в сравнительно короткий срок разработать и поэтапно внедрить замкнутые системы водопользования отдельных производств К примеру, на химических предприятиях комплексные мероприятия по созданию замкнутых систем обеспечения позволили снизить удельные расходы свежей воды и, естественно, сточных вод на единицу продукции Так, на предприятиях, вырабатывающих хи-

мическое волокно, удельное водопотребление снижают в два этапа 1-й этап – выполнение организационно-технических мероприятий, позволяющих сократить водопотребление и не требующих капитальных затрат и дополнительного оборудования, 2-й этап – реализация этих мероприятии с использованием дополнительного оборудования или модернизация существующего

2.1.Основные принципы создания замкнутых систем

Переход на замкнутые системы технического водоснабжения на каждом отдельном производстве, предприятии и промышленном узле определяется, в зависимости от местных условий, тремя основными факторами дефицитом воды, исчерпанием ассимилирующей способности водных объектов, предназначенных для приема сточных вод, экономическими преимуществами по сравнению с существующей технологией, т е прямоточными системами водоснабжения и очисткой сточных вод перед их сбросом в водные объекты до кондиций, обусловленных требованиями Правил охраны вод и Государственного водного надзора

Применение замкнутых систем водообеспечения при проектировании химических предприятий позволяет размещать эти объекты в районах с ограниченными водными ресурсами, но с экономико-географическими условиями, благоприятными для развития производительных сил Такое инженерно-экологическое направление развития водного хозяйства считается наиболее прогрессивным и перспективным, т к позволяет решить проблему водообеспечения и одновременно удовлетворить требованиям, касающимся охраны окружающей среды

Общие принципы создания замкнутых систем водного хозяйства в настоящее время разработаны для химических предприятий К основным из них можно отнести следующие

1 Создание замкнутых систем водообеспечения должно сочетаться с организацией безотходного производства, технология которого ориентирована на максимальное извлечение из сырья основных продуктов

2 Проектирование замкнутых систем следует начинать с детальной проработки мероприятий, направленных на вывод отходов из технологических процессов преимущественно в безводной твердой форме, а если это невозможно, то в виде высококонцентрированных растворов для последующей их утилизации

3 Принципиальная схема водного хозяйства при бессточном производстве должна включать в себя как минимум один из трех основных циклов многократного использования воды. термический (для охлаждения), экстрагентный (для промывки, растворения, выщелачивания и т д), транспортный (для гидравлического транспортирования веществ, материалов и удаления отходов).

4 Потоки сточных вод следует разделять по видовому, фазовому, концентрационному, энтальпийному признакам для разработки соответствующего способа локальной очистки каждого потока вплоть до потоков отдельных стадий технологического процесса

5 Для наиболее водоемких операций или технологических процессов

необходимо установить научно обоснованные требования к качеству потребляемой в производстве воды, а также нормы на качество отводимых сточных вод, первоочередному отведению на локальную очистку или обработку подлежат наиболее загрязненные и нагретые воды

6 При замкнутых системах следует объединить цехи водоподготовки с цехами локальной очистки предприятия или группы предприятий, а также использовать ливневый сток с промышленной площадки в системе оборотного водоснабжения

При проектировании систем в обязательном порядке учитывают возможные отрицательные последствия (например, возможность биологических наслоений на трубопроводах и стенах охлаждаемых агрегатов, загрязнение атмосферы), предусматривают соответствующие инженерные мероприятия по предотвращению таких явлений

Анализ существующих решений и проектных материалов показывает, что создание экономически рациональных замкнутых систем водного хозяйства на химических предприятиях – задача достаточно трудная, но вполне разрешимая Сложный физико-химический состав сточных вод, разнообразие содержащихся в них соединений и возможность взаимодействия их друг с другом делают невозможным подбор универсальной структуры замкнутых схем Создание таких систем на предприятиях зависит от особенностей технологии, технической оснащенности, требований к качеству получаемой продукции и используемой воды и т д

Использование воды на промышленных предприятиях по замкнутому циклу тесно связано с технологией основного производства Система водного хозяйства предприятия должна быть единой, т е «заведовать» водоснабжением, водоотведением, очисткой сточных вод и их подготовкой для технического водоснабжения, сброс сточных вод в водные объекты должен быть исключен.

Свежую воду из водных источников следует расходовать только для подпитки замкнутых систем (а при недостатке очищенных сточных вод – для восполнения потерь воды в этих системах), для питьевых и хозяйственно-бытовых целей, а также для технологических операций, в которых очищенные сточные воды не могут быть использованы по условиям гигиены и специальным требованиям технологии производства

Современные технология и техника очистки способны обеспечить получение воды, по существу, любой заданной степени чистоты из любой сточной воды, т.е создание замкнутых систем может тормозиться причинами только экономического характера

Для достижения наилучших технико-экономических показателей при создании замкнутых систем водоснабжения на химических предприятиях должны также прорабатываться следующие вопросы

– максимальное внедрение воздушного охлаждения вместо водяного,

– многократное (каскадное) использование воды в технологических процессах, в том числе и с целью получения наименьшего объема загрязненных сточных вод, для обезвреживания которых можно подобрать эффективные локальные методы очистки;

– регенерация отработанных кислот, щелочных и солевых технологических растворов с использованием извлекаемых продуктов в качестве

вторичного сырья

Создание замкнутых водооборотных систем предопределяет необходимость разработки научно обоснованных требований к качеству воды, используемой во всех технологических процессах и операциях Как показывает практика, для большинства технологических процессов нет необходимости в использовании питьевой воды; поэтому целесообразно в каждом конкретном случае определять максимально допустимые пределы основных показателей качества воды, которые оказывают решающее влияние на качество получаемого продукта или безаварийную работу технологического оборудования

Локальная очистка сточных вод для их повторного использования в производстве во многих случаях дешевле их полной очистки в соответствии с существующими требованиями, а создание замкнутых систем, предусматривающих полное выделение всех компонентов из сточных вод, является важнейшей составной частью безотходного производства.

Научно-техническую задачу создания экономически обоснованных замкнутых систем можно сформулировать следующим образом

1. *Затраты на регенерацию воды из сточных вод и затраты на доведение образующихся при их очистке осадков до товарного продукта или вторичного сырья должны быть ниже суммарных затрат на водоподготовку и очистку сточных вод до показателей, позволяющих сбрасывать последние в водные объекты.*

2. *Проектирование систем водоснабжения и канализации промышленных предприятий должно выполняться одновременно с проектированием основного производства.*

Элементы замкнутых систем водопользования. Вода в производстве выполняет целый ряд функций. Так, в черной металлургии вода используется в основном в качестве охлаждающего агента, поглощающей среды, экстрагента, транспортирующего агента, в металлургической промышленности – в качестве охлаждающего агента, поглощающей среды и экстрагента, в цветной металлургии – в качестве реакционной среды и охлаждающего агента· в целлюлозно-бумажной – в качестве реакционной среды, экстрагента и охлаждающего агента, в химической и нефтехимической – в качестве охлаждающего агента, промышленного сырья, экстрагента, реакционной и поглощающей среды, компонента вакуумных систем В связи с таким разнообразием функций, выполняемых водой, необходима разработка правил ее использования

Необходимость применения воды в конкретном производстве должна быть всесторонне обоснована (технически, экономически и экологически), в первую очередь следует проработать вариант (варианты) безводной технологии

Если вода используется как р а с т в о р и т е л ь, необходимо рассмотреть условия ее регенерации Например, при использовании растворов поваренной соли для высаливания красителей, мыл и других продуктов

должны быть оценены условия регенерации растворов для возврата их в процесс или условия их подготовки для использования в другом технологическом процессе

Значительное количество воды в промышленности расходуется в качестве э к с т р а г е н т а для промывки сырья, полупродукта, продукта и для очистки газовых выбросов и твердых отходов Сюда же следует отнести промывку изделий после травления, обезжиривания и нанесения гальванопокрытий в черной металлургии, машиностроении и металлообработке, целлюлозы – в целлюлозно-бумажной промышленности, волокна – на предприятиях производства химических волокон, нитей и тканей – в легкой промышленности; ионообменных смол – при обессоливании воды, газовых выбросов – на предприятиях различных отраслей промышленности и т д В этих случаях наиболее рациональным будет противоточный ступенчатый режим промывки при минимальном расходе свежей воды на последней стадии промывки и вывод из системы концентрированных промывных вод, которые направляют на восполнение потерь технологического раствора или регенерируют (перерабатывают) совместно с отработанными растворами Для повышения эффективности промывки при минимальном расходе промывной воды целесообразно использовать различные технические приемы. ванны улавливания, подачу воздуха, отжим, фильтрование и др , а также совершенное оборудование

Если почему-либо невозможно получить промывные воды с низкой концентрацией загрязняющих веществ, то целесообразно выводить их из системы двумя потоками Первый (концентрированный) перерабатывают отдельно или совместно с отработанным технологическим раствором Второй (слабозагрязненный) можно использовать в другом технологическом процессе без подготовки или после необходимой обработки

Использование воды для очистки газов от водорастворимых органических соединений допустимо в том случае, если из газов водой извлекаются, а затем утилизируются ценные компоненты, если предполагают использовать воду для очистки газов от твердых частиц, процесс целесообразно осуществлять в замкнутом цикле Для очистки воздуха от пыли лучше использовать сухие фильтры

При использовании воды в качестве о х л а ж д а ю щ е г о а г е н т а необходимо предварительное технико-экономическое обоснование возможности и целесообразности следующих стадий

– рекуперация тепла технологических жидкостей и растворов путем теплообмена между их холодным и горячим потоками,

– утилизация отводимого высокотемпературного тепла для получения энергетического и технологического водяного пара путем испарительного охлаждения,

– утилизация отводимого тепла газообразным, жидким или твердым сырьем,

– передача избыточного тепла на соседние предприятия,

– использование специфики производства, например охлаждающей способности природного газа при его расширении на выходе из скважины, отвода избыточного тепла с конечным товарным продуктом;

– использование климатических особенностей местности, где находит-

ся предприятие (низкие температуры наружного воздуха, ветры, холод стратосферы, вечная мерзлота, ледники, холодные родниковые воды и т п.) для целей охлаждения,

– применение воздушно-испарительного, двухконтурного испарительного и воздушного охлаждения,

– применение холодильных установок

Целесообразно применение в первую очередь воздушного, воздушно-испарительного и двухконтурного испарительного водоснабжения Основное преимущество аппаратов воздушного охлаждения (АВО) перед градирнями, брызгальными бассейнами и прудами-охладителями заключается в отсутствии потерь воды на испарение и ветровой унос Охлаждающая вода циркулирует в замкнутой системе, поэтому к оборотной воде не предъявляются такие жесткие требования, как в системах водяного охлаждения АВО просты и удобны в эксплуатации, могут работать в любых климатических условиях

При двухконтурном водоснабжении продукт охлаждается хладагентом, представляющим собой газ (аммиак, пропан) или дистиллированную воду и т п Под действием давления и охлаждающей воды в холодильной станции газ превращается в жидкость (изменяет свое агрегатное состояние) Благодаря применению такой схемы теплообменные аппараты не загрязняются

Если температура воды не оказывает влияния на технологический процесс, наиболее экономично испарительное охлаждение Установка испарительного охлаждения работает на химически очищенной воде Тепло, отбираемое охлаждающей водой, затрачивается на нагревание воды до температуры ее кипения и испарения Один килограмм охлаждающей воды отводит $2{,}56 \cdot 10^6$ Дж тепла (против $4{,}2 \cdot 10^4$ Дж при водяном охлаждении), что позволяет, с одной стороны, сократить расход воды в 60 раз и, с другой, использовать тепло образующегося пара.

Использованию воды в качестве транспортирующего агента должен предшествовать анализ возможности механического или пневматического транспортирования пыли, шлама, воды При необходимости использования воды система проектируется замкнутой Поскольку к оборотной воде систем гидротранспорта высокие требования не предъявляются, целесообразна передача в нее сточных вод из других систем

На рис 2 1 показана модель очистки сточных вод и подготовки их к использованию в системе оборотного водоснабжения без сброса сточных вод в водоемы

При создании системы замкнутого водопотребления должны быть учтены, с одной стороны, требования к качеству воды, а с другой – количество потребляемой воды Вода наиболее высокого качества требуется для охлаждения энергетического оборудования, менее высокого – в технологических процессах (растворение, промывка и т д), для охлаждения и в качестве транспортного средства В то же время наибольшее количество воды расходуется на охлаждение и транспортирование, меньшее – в технологическом процессе и еще меньшее – для энергетических систем Это позволяет первоначально использовать воду в технологических цехах, затем, после необходимой очистки, – для охлаждения, после чего, уже без

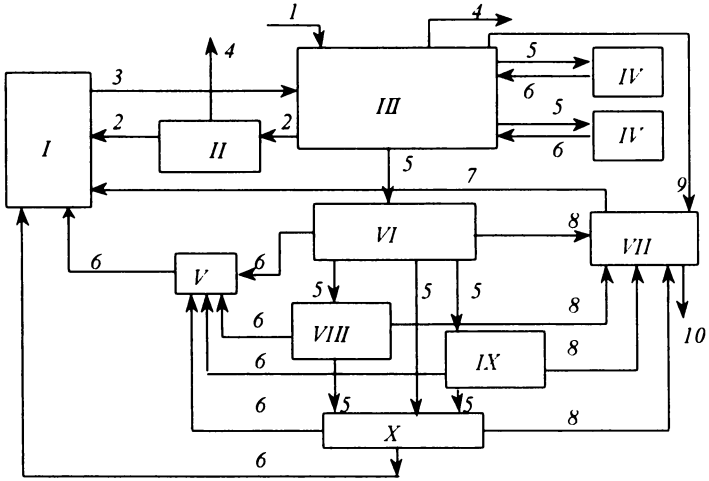


Рис 2 1 Модель системы очистки сточных вод и подготовки их к использованию в системе оборотного водоснабжения без сброса сточных вод в водоемы

I – узел оборотного водоснабжения, *II* – узел охлаждения чистой воды, *III* – технологические установки, *IV* – системы локальной оборотной очистки, *V* – узел дополнительной очистки, *VI* – узел механической очистки, *VII* – узел подготовки отходов, *VIII* – узел физико-химической очистки, *IX* – узел химической очистки, *X* – узел биологической очистки, *1* – линия воды, забираемой из водоема на подпитку, *2* – оборотная охлаждаемая вода, *3* – линия чистой воды, возвращаемой в технологические установки, *4* – потери воды, *5* – линии сточных вод, *6* – линии очищенных сточных вод, *7* – линия подачи чистой воды из узла подготовки отходов, *8* – линии отвода из очистных устройств отходов, содержащих воду, *9* – линия возвращения полезных отходов в технологические установки, *10* – линия отвода отходов на уничтожение

очистки, – в качестве транспортного средства или вновь направить ее в технологический цикл, а после глубокой доочистки и обессоливания – для охлаждения различного энергетического оборудования

При создании замкнутых водооборотных циклов обязательным условием является выделение трех различных циклов водоснабжения охлаждающего, экстрагентного (или технического) и транспортного В связи с этим необходима разработка научно-обоснованных требований к качеству воды, используемой во всех технологических процессах, по показателям, влияющим на качество получаемого продукта При этом необходимо строго обосновать целесообразность проведения процесса с применением водной среды Если вода используется в качестве экстрагента (для промывки продуктов и полупродуктов, газов, оборудования и т п), то необходимо сопоставить такую промывку с промывкой в неводной (промывка оборудования растворителями) и водо-воздушной средах

Рекомендуется противоточный режим промывки с выведением

а) минимального количества высококонцентрированных промывных вод, переработка которых целесообразна вместе с отработанным раствором,

и б) основного количества промывной воды, концентрация загрязнений в которой не препятствует ее применению в производстве

Во многих случаях при создании замкнутых систем учитывают сбор, очистку и использование в техническом водоснабжении поверхностных стоков с территории предприятий Эти стоки отличаются, как правило, значительным содержанием взвешенных веществ, нефтепродуктов, присутствием органических веществ естественного происхождения, продуктов органического синтеза и др Согласно требованиям «Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами» (№ 1166—74), сброс этих стоков в водные объекты без соответствующей очистки запрещен В то же время использование их после коагуляции и очистки позволяет сократить потребление свежей воды, а в ряде случаев и затраты на очистку перед сбросом в водный объект, поскольку требования к воде, используемой в технологических процессах, обычно ниже, чем при сбросе в водоем

Мероприятия по обессоливанию сточных вод для их повторного использования во многих случаях заметно влияют на экономическую эффективность замкнутых систем Объем продувок в этом случае сокращается до 1% и менее В настоящее время очистка минерализованных вод осуществляется дистилляцией, электродиализом, обратным осмосом, замораживанием, ионным обменом, экстракцией и другими методами Наиболее перспективными и освоенными в промышленных масштабах являются три первые метода

Технико-экономический анализ различных методов обессоливания показал, что при опреснении минерализованных вод с солесодержанием свыше 10 г/л более выгодной является *дистилляция.* При солесодержании менее 10 г/л предпочтительнее будут *мембранные методы* – обратный осмос и электродиализ Поэтому в настоящее время преобладающая роль принадлежит дистилляционным опреснителям, на долю которых приходится 67% На долю мембранных методов приходится 33% (23% – обратноосмотические установки и 10% – электродиализные) По мнению специалистов, дистилляция является пока основным методом получения пресной воды в крупных промышленных масштабах, а при переработке высококонцентрированных растворов, рассолов и рапы ей пока нет альтернативы Удельные капитальные и эксплуатационные расходы на обессоливание воды различными методами представлены в табл 2 1 и 2 2 Динамика снижения энергетических затрат приведена в табл 2 3

Для широкого внедрения опреснительной техники в промышленных масштабах разработаны и апробированы различные методы опреснения Наибольшая производительность единичного блока на действующих опреснительных установках дистилляционного типа в нашей стране составляет 15 тыс $м^3$/сут.

Увеличение же производительности блока в 2-3 раза позволяет снизить капитальные затраты на 14-21% По-прежнему сохраняется практический интерес к *ионитному методу,* который в ближайшие 10-15 лет останется самым распространенным и экономически предпочтительным методом глубокого обессолнвания воды средней минерализации (до 2 г/л)

Таблица 2 1 Капитальные затраты и эксплуатационные расходы на опреснение воды различными методами в зарубежных странах

Виды затрат	Дистилляция	Электродиализ	Обратный осмос
Удельные капитальные затраты, дол за 1 $м^3$/сут	0,33-0,58	0,13-0,20	0,09-0,24
Эксплуатационные расходы, дол за 1 $м^3$/сут	0,77-0,79	0,17-0,32	0,24-0,33

Таблица 2.2. Капитальные затраты на опреснение воды различными методами в России (в коп/$м^3$, по состоянию на 1990 г)

Метод опреснения	Массовая концентрация солей в исходной воде, г/$дм^3$	Капитальные затраты на установки производительностью ($м^3$/сут)			
		2400	7200	12000	24000
Дистил-	2,0	106	85	72	61
ляция	3,5	120	98	81	70
	5,0	136	112	92	80
	10,0	159	132	109	95
	20,0	186	156	130	113
	35,0	220	185	154	135
Электро-	2,0	96	74	70	73
диализ	3,5	96	85	77	77
	5,0	144	128	115	115
	10,0	191	170	153	153
Обрат-	2,0	192	89	79	79
ный	3,5	206	97	89	86
Осмос	5,0	227	105	94	94
	10,0	269	124	112	112

Таблица 2 3. Динамика снижения расхода первичной энергии на опреснение морской воды (в МДж/$м^3$)

Метод опреснения	1950-1960 гг	1960-1970 гг	1970-1980 гг	1980-1990 гг
Дистилляция	2900-950	950-350	350-130	130-50
Электродиализ	–	400-300	300-200	200-80
Обратный осмос	–	300-200	200-100	100-50

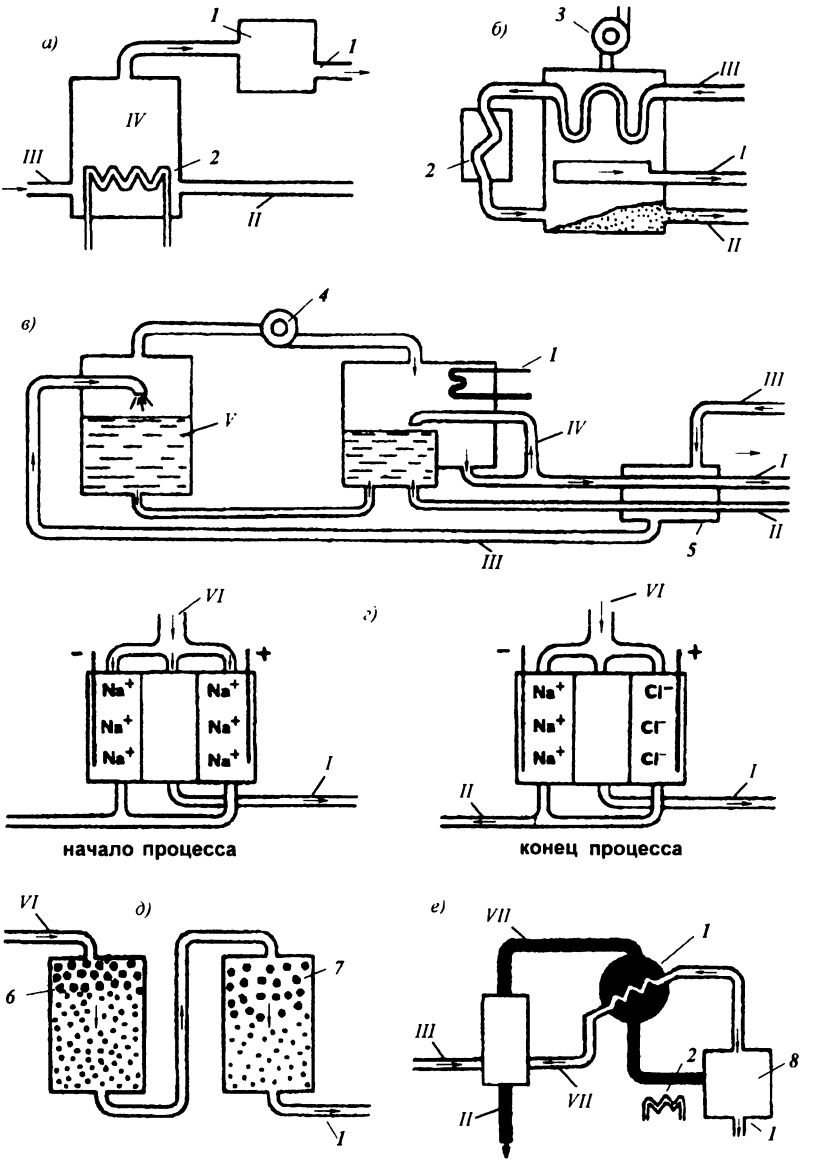


Рис 2 2 Принципиальные схемы наиболее распространенных способов обессоливания вод

а – дистилляция, *б* – испарение, *в* – вымораживание, *г* – электродиализ, *д* – ионный обмен, *е* – экстракция *I* – пресная вода, *II* – рассол, *III* – морская вода, *IV* – вода для промывки льда, *V* – лед + рассол, *VI* – соленая вода, *VII* – холодный экстрагент + пресная вода, *VIII* – охлажденный экстрагент; *1* – холодильник, *2* – нагреватель, *3* – вакуумный насос, *4* – компрессор, *5* – теплообменник, *6* – колонка катионного обмена, *7* – колонка анионного обмена, *8* – экстрактор

К перспективным методам обессоливания относят также *электродиализ* и *гиперфильтрацию.* Электродиализ позволяет при переработке промышленных сточных вод получать обессоленную чистую воду и концентрированные соли в сбросных рассолах Разработаны конструкции крупногабаритных электродиализаторов, технология изготовления мембран, элементов электродиализных аппаратов, что позволит в ближайшее время приступить к проектированию станций обессоливания воды производительностью до 10-20 тыс $м^3$/сут На рис 2 2 приведены принципиальные схемы наиболее распространенных способов обессоливания вод

Если себестоимость опресненной методом электролиза воды с солесодержанием 3-5 г/л на установках производительностью 25-500 $м^3$/сут принять за одну единицу, то удельные капитальные вложения на 1 $м^3$ суточной производительности станций составляют при тех же условиях для дистилляции 1600-2000 единиц, для электродиализа и гиперфильтрации 500-700 единиц

Особенностью замкнутых водооборотных систем является обязательный учет токсикологической и эпидемиологической характеристик очищенной сточной воды и ее воздействия на человека Для предотвращения загрязнений воздушного бассейна и почвы в районе градирен необходимо обеспечить минимальный унос из них капельной влаги (в обычных условиях он достигает 0,3% и более)

При использовании очищенных сточных вод для пополнения систем охлаждающего водоснабжения унос не должен превышать 0,05-0,1%, так как капли влаги могут содержать вредные вещества. Снизить унос воды до 0,05% позволяет применение конструкции градирен, разработанных во ВНИИводгео

2.2. Утилизация осадков сточных вод химических предприятий

При эксплуатации очистных сооружений в структуре замкнутых систем водообеспечения химических производств образуется значительное количество различных осадков (или шлама), которые представляют собой, как правило, смесь различных механических примесей (минерального и органического происхождения) и воды Во многих случаях эти осадки складируют в различных поверхностных хранилищах Однако этот метод является вынужденным и экономически не оправданным, поскольку его реализация связана с отчуждением больших пространств земли, загрязнением поверхностных и подземных вод, поэтому его нельзя рекомендовать для широкого внедрения

В последние годы получило распространение закачивание осадков в глубинные горизонты и подземные пустоты естественного и искусственного происхождения отработанные выработки различных рудников или шахт, пройденные, как правило, в плотных устойчивых породах (глины,

гипсы, каменная соль, глинистые сланцы и т д), а также специально сооружаемые хранилища Способы разработки подземных пустот весьма разнообразны Применяют, например, метод камуфлетных взрывов (пластичные глинистые породы), горный способ (устойчивые породы), выщелачивание или размыв (отложения каменной соли) Однако закачивание отходов в подземные горизонты может привести к непредвиденному распространению загрязняющих веществ под землей, поэтому этот метод следует применять только при гарантированном исключении нежелательных последствий

Для ряда жидких и пастообразных осадков, переработка которых механическими, биологическими, физико-химическими, радиационными и другими методами не дает удовлетворительных результатов, используют огневое обезвреживание при 850-980°С и выше В современных агрегатах огневого обезвреживания, построенных на энерготехнологической основе, наряду с разложением органических примесей до безвредных веществ возможно извлечение ценных неорганических соединений, используемых в дальнейшем как производственное сырье Основные недостатки этого метода – большой расход топлива для полного окисления токсичных веществ и необходимость очистки отходящих газов Следует отметить, что при высокой концентрации горючих примесей процесс огневого обезвреживания может быть практически автотермичным с минимальным расходом топлива лишь на предварительный разогрев реактора

Анализ известных методов обработки и закачивания жидких и пастообразных отходов показывает, что эти методы не позволяют полностью решить вопросы, связанные с охраной природы от производственных загрязнений В ряде случаев возникает необходимость ликвидации вторичных загрязнений, и часто (например, при складировании и закачивании в подземные горизонты) бывает трудно прогнозировать возможные последствия

Способы обработки осадков сточных вод, суть которых сводится к уменьшению их объемов и улучшению структуры для последующего использования, а также необходимое оборудование перечислены на рис 2 3

Несколько отличается от основных способов обезвоживания способ, реализуемый в метантенках и аэротенках-стабилизаторах – сооружениях, предназначенных для анаэробной и аэробной стабилизации осадков (чаще всего бытовых сточных вод) В указанные группы не вошли такие вспомогательные способы, как химическая или тепловая обработка, предшествующие механическому обезвоживанию и проводимые для уменьшения удельного сопротивления обрабатываемой суспензии

Цель всех основных способов обработки состоит в том, чтобы обезводить осадок, т е уменьшить его объем В этом отношении уплотнение может дать наиболее ощутимый эффект Снижение влажности исходного ила всего лишь на несколько процентов приводит к уменьшению более глубокого уплотнения, которого в некоторых случаях можно добиться последовательным применением устройств первой группы обработки (см рис 2 3), переходя после уплотнения сразу к термической сушке (минуя стадию механического обезвоживания), может оказаться экономически и технически вполне оправданным

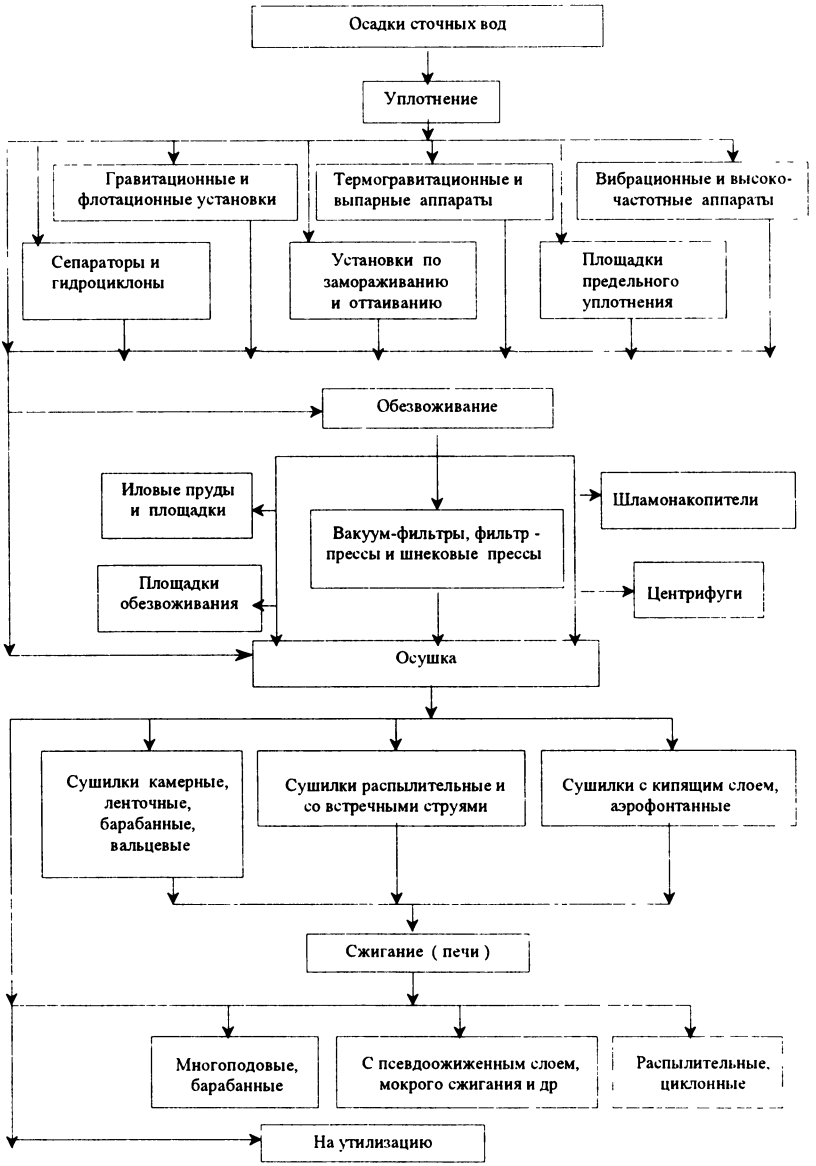


Рис 2 3. Основные способы обработки осадков сточных вод и применяемое оборудование

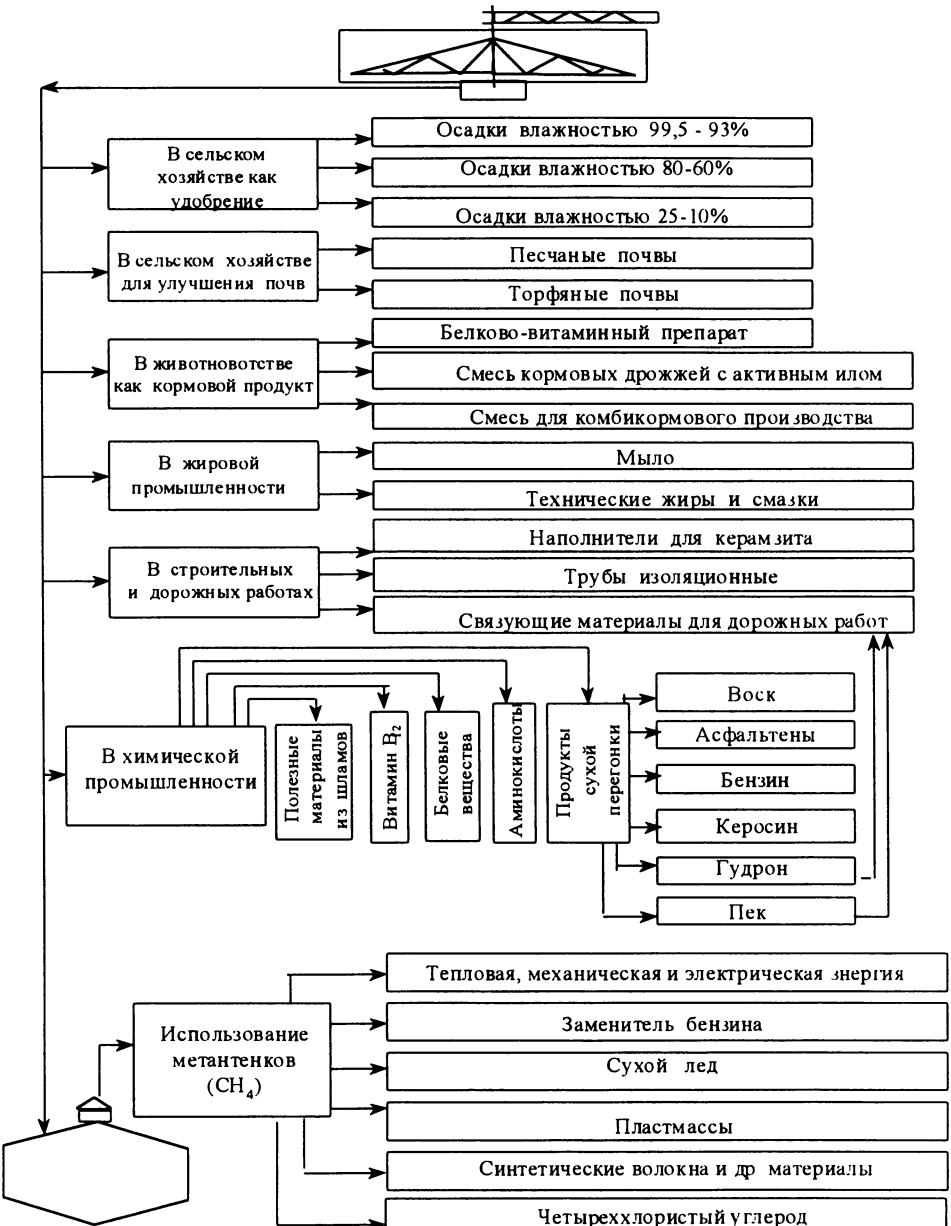


Рис 2 4 Утилизация осадков сточных вод

До сих пор огромное количество осадков сточных вод остается неиспользованным или используется весьма ограниченно, в лучшем случае как удобрение Утилизация осадков сточных вод, содержащих органические вещества, позволяет получать много ценных продуктов и материалов для народного хозяйства (рис 2 4)

1) в сельском хозяйстве – использование осадков как ценного удобрения, превращение песчаных почв в плодородные участки, использование активного ила как белково-витаминного корма для подкормки животных и птиц или для получения полноценной кормовой смеси, состоящей из кормовых дрожжей и активного ила,

2) в промышленном производстве – утилизация жировых веществ для получения технического жира и консистентных смазок, использование осадков для строительных и дорожных работ, производство технического витамина B_{12} для комбикормов; получение белковых веществ и аминокислот; из осадков сухой перегонкой можно получать ценные химические продукты;

3) при использовании газа метантенков – получение тепловой, механической и электрической энергии; использование газа для бытовых нужд или для переработки его в заменитель бензина, производство химических продуктов

Таблица 2.4 Химический состав активного ила и некоторых кормовых препаратов

Источники активного ила и кормовые продукты	Химический состав, % к абсолютно сухой массе					
	белки	жиропо-добные ве-щества	клет-чатка	БЭВ*	золь-ность	азот
Стоки завода синтетических жирных кислот и спирта	24-30	3,7	0,8	0,8	3,0	3,9-4,8
Стоки Лисичанского Химкомбината	46,7	3,8	–	–	16,6	7,5
Кормовые дрожжи	44,6	0,5	1,5	53,4	8,3	–
Препарат КМБ-12	30,9	0,8	6,6	61,7	38,7	–
Мясокостная мука	37,2	14,4	–	48,7	32,9	–
Рыбная мука	59,4	1,9	–	38,7	25,7	–
Подсолнечный шрот	38,9	2,5	15,2	43,4	6	–
Травяная клеверная мука	13,1	4,2	23,2	54,5	7,2	–
Горох	21,7	1,5	4,3	72,5	2,6	–
Ячмень	10,9	5,4	5,2	78,5	3	–

*БЭВ** – безазотистые экстрактивные вещества

Бактериальная природа активного ила, образующегося в системе биохимических очистных сооружений, обусловливает высокое содержание в нем белковых веществ, аминокислот, микроэлементов, витаминов группы В, в том числе витамина B_{12}, т е использование активного ила для получения полноценного продукта, пригодного для кормления домашних животных, птиц, пушных зверей, рыб, весьма перспективно.

Большая работа по определению кормовой ценности активного ила была проведена в ряде научно-исследовательских институтов (ВНИИгидролиз, Институт питания АМН РФ, Ленинградский ветеринарный институт, Академия коммунального хозяйства им К П Памфилова, Уфимский ВНИИ сельского хозяйства и др) Были разработаны и испытаны в производственных условиях новые технологические схемы получения сухого активного ила как кормового продукта, различные схемы обработки сырых и сброженных осадков, смешанных осадков и активного ила, а также исследована питательная ценность смесей кормовых дрожжей с активным илом, составлены технические условия на сухой активный ил и на смесь как кормовой продукт

Химический состав активного ила свидетельствует о его высокой кормовой ценности (табл 2 4) Помимо продуктов, перечисленных в этой таблице, в иле содержится также много витаминов группы В тиамин (B_1), рибофлавин (B_2), пантотеновая кислота (B_3), холин (B_4), никотиновая кислота (B_5), пиридоксин (B_6), биотин (B_7), *м*-инозит (B_8), цианокобаламин (B_{12})

На рис 2 5 приведена технологическая схема производства белкового витамина с уплотнением ила в термогравитационных уплотнителях (ТГУ), а затем на сепараторах с последующей его сушкой в распылительной сушилке Схема отличается простотой, надежностью и экономичностью Применение термогравитационных уплотнителей активного ила выявило положительные факторы, связанные с его сгущением Например, в ТГУ достигается более глубокое сгущение ила, чем в сепараторе(по взвешенным веществам в среднем 96,5%) После нагревания ил, становясь менее вязким, лучше сепарируется – в среднем до 95%-ной влажности по взвешенным (или 94%-ной – по сухим) веществам Производительность сепаратора после ТГУ можно принимать равной 10-12 $м^3$/ч (вместо 8-10 $м^3$/ч на неподогретом иле), при этом сепаратор на подогретом иле работает более продолжительное время (7-8 ч вместо 5-6 ч на иле без подогрева), и фугат получается более чистым Следует отметить, что после обработки в ТГУ полностью гибнут яйца гельминтов и уничтожается кишечная палочка Расходуемый пар для подогрева ила в ТГУ до 80-90°С в значительной мере экономится при последующей термической сушке ила

Технологическая схема предусматривает поступление избыточного активного ила из вторичного отстойника *1* на иловую насосную станцию *2*. Затем ил по трубопроводу *3* перекачивается в ТГУ *4*, где в результате подогрева уплотняется с 99,5-99 %-ной до (в среднем) 96,5 %-ной влажности по взвешенным веществам После ТГУ ил поступает в сборную емкость *9*, откуда насосом *10* перекачивается на вторую ступень сгущения в сепараторе *11*. После второго уплотнения ил собирается в емкости *12* и насосом *14* перекачивается в распылительную сушилку *15* В схеме предусмотрен возврат фугата с концентрацией сухих веществ 3-6 г/л по трубопроводу *13* на иловую насосную

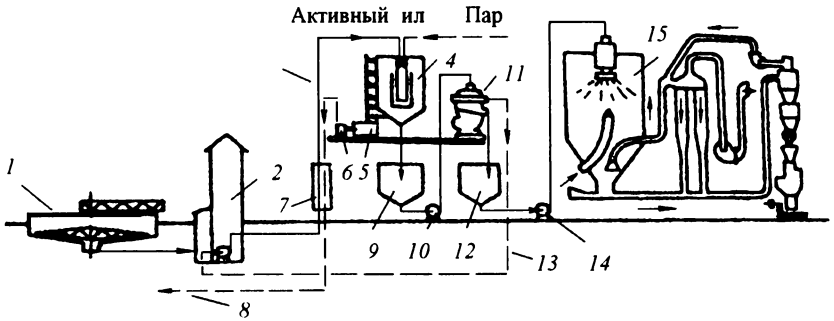


Рис 2 5 Технологическая схема производства белкового витамина с двухступенчатым сгущением ила в ТГУ и сепараторах с последующей сушкой в распылительной сушилке

1 – вторичный отстойник, *2* – насосная станция, *3* – трубопровод, *4* – ТГУ, *5* – емкость, *6* – насос, *7* – теплообменник, *8* – очистные сооружения, *9* – сборная емкость, *10* – насос, *11* – сепаратор, *12* – емкость, *13* – трубопровод, *14* – насос, *15* – сушилка

станцию *2* или в отдельную емкость Декантированная горячая иловая вода после термогравитационного уплотнения собирается в емкости *5*, откуда насосом *6* перекачивается в теплообменник *7* для предварительного подогрева исходного ила. После теплообменника иловую воду используют как биостимулятор в дрожжерастительных аппаратах или возвращают ее на очистные сооружения *8*

В табл 2 5 перечислены продукты, получаемые при сухой перегонке осадков Для сравнения в ней приведены результаты сухой перегонки торфа и каменного угля После сухой перегонки осадков остается около 50% полукокса, представляющего собой черную порошкообразную массу Полукокс содержит большое количество горючих веществ и может быть использован как пылевидное топливо; кроме того, он содержит фосфор и около 3% азота, что делает его весьма ценным удобрением под сельскохозяйственные культуры

Таблица 2 5 Результаты сухой перегонки осадков при 450°С(в скобках указаны дополнительные потери по массе)

Сырье	Продукты перегонки, % от абсолютно сухого вещества			
	первичный деготь	пирогенетическая вода	первичный газ	полукокс
Сырые осадки из отстойника	26,3	12,3	12(2,9)	46,5
Сброженные осадки из метатенков	15,3	14	12(3)	55,7
Активный ил	24,85	15,2	10(2,55)	47,4
Торф	11,8-25,9	11,8-26,4	17-18,7	41-47
Бурый уголь	4	7,6	18,6	69,8
Антрацит	14,2	6,9	8	64,1

В результате сухой перегонки осадков выделяется 12% (от абсолютно сухого вещества) первичного газа или 20% по отношению к органическим веществам. В общей сложности газообразные продукты содержат около 68% горючих веществ, которые могут быть использованы как топливо Пирогенетическая вода, собираемая в таком же количестве, как и первичный газ, имеет щелочную реакцию и содержит много полезного свободного аммиака и общего азота.

Наиболее ценные продукты можно получить из первичного дегтя после его соответствующей обработки; ниже перечислены продукты, полученные из 100 т сухих осадков (в тоннах):

Воск	2	Бензин	3
Асфальтены	3	Керосин	7
Пиридиновые основания	0,8	Гудрон (кислый)	2
Фенолы	0,25	Пек	1,5

Как показали исследования, из дегтя целесообразно выделять продукты, близкие по составу к горному воску (его применяют в электротехнической, кожевенно-обувной и полиграфической промышленности), а также горючее для двигателей и пек (идет на изготовление брикетов и изоляционных плит).

Схема технологического процесса сухой перегонки осадков применительно к заводу, перерабатывающему 125 т/сут абсолютно сухих осадков, показана на рис. 2.6 Такая производительность соответствует, например, мощности первой очереди Курьяновской станции аэрации (Москва).

Осадки влажностью 10% поступают из склада *1* в две дробилки *2* производительностью 6 т/ч каждая. После дробления осадки поднимаются транспортером *3* в бункер *4*, из которого поступают в газовую печь *5* наружным диаметром 3м и высотой 6м Всего установлено три печи, из которых одна резервная. Печи обогреваются газом с расчетной температурой 450-500 °С. Полукокс удаляется через нижнее разгрузочное отверстие Газ, смола и пары воды из печи поступают в газосборник *6*, из которого смола и вода (в жидком состоянии) стекают в водоотделитель *7*, а газ подвергается предварительному охлаждению в аппарате *8* и очистке.

Газ очищают от сероводорода и диоксида углерода, промывают известковым молоком, а затем железосодовым раствором ($FeCO_3$) Поглощение CO_2 осуществляется в трех скрубберах *9*, а H_2S – в двух других скрубберах *10* Очищенный газ поступает в мокрый газгольдер *11*, откуда расходуется как топливо. Использованный железосодовый раствор сливается в емкость *12* и насосом *13* перекачивается в барботеры *14* для регенерации

Смолу отделяют от надсмольной воды в водоотделителе *7*, снабженном змеевиком для обогрева паром. Отсюда надсмольная вода с механическими примесями поступает в техническую канализацию, а очищенная и освобожденная от воды смола направляется в два хранилища *15*

Воск выделяется из смолы в аппарате-экстракторе *17* В верхнюю часть экстрактора насосом подается смола, а в нижнюю – бензин из емкости *16*. Раствор воска в бензине из верхнего штуцера экстрактора *17* переходит в промежуточную емкость *19*, из которой насосом *20* подается для охлаждения в кристаллизаторы *21* Смолообразующие вещества собираются в емкости *18* и передаются на последующую переработку Раствор воска в бензине, охлажденный до 5-8 °С, после кристаллизаторов подается в центрифугу *22*, откуда попадает в резервуар *23*, предназначенный для плавления воска

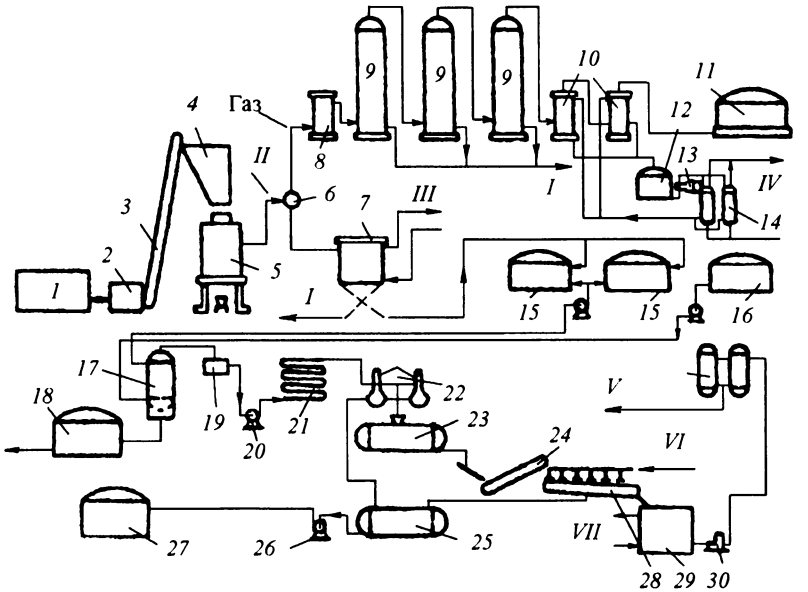


Рис 2.6 Схема технологического процесса сухой перегонки осадков сточных вод *I* – вода в канализацию, *II* – смола и пары воды, *III,VII* – пар, *IV* – сероводород на переработку, *V* – воск на розлив, *VI* – бензин, остальные пояснения в тексте

Расплавленный воск гранулируется водой и по наклонному транспортеру *24* подается на закрытый транспортер *28,* где он окончательно промывается от примесей и вторично плавится в резервуаре *29* Отсюда поршневым насосом *30* масса подается на фильтры *31,* затем воск поступает на розлив

Отделенный в центрифуге бензин поступает в бак *25,* из которого насосом *26* перекачивается в резервуар *27,* предназначенный для экстракции воска

Полезные составные части осадков, подвергнутые сухой перегонке, могут представлять большую ценность

Нефтепродукты, уловленные со всех сооружений оборотного водоснабжения и производственной канализации нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (нефтеотделителей, песколовок, нефтеловушек, прудов отстоя и других сооружений), обрабатывают в специальных резервуарах с подогревом Далее обезвоженные нефтепродукты, как правило, передаются в производство.

В процессе очистки нефтесодержащих сточных вод образуется значительное количество нефтешлама, состоящего в основном из механических примесей, поступающих в сточные воды вместе с нефтью и водой

Утилизировать нефтешлам довольно трудно В нашей стране и за рубежом в последние годы предложены следующие способы переработки нефтяных шламов и утилизации содержащихся в них нефтепродуктов

– предварительное обезвоживание, термическая или пресс-сушка обводненного шлама и переработка полученных нефтепродуктов по различным схемам (в зависимости от качества органической части, выделенной из шлама);

– предварительное обезвоживание, термическая сушка, брикетирование высушенного шлама с различными наполнителями (угольной пылью, опилками, сланцами и т д.) и использование брикетов в качестве топлива,

– газификация обезвоженного или частично обезвоженного шлама,

– сжигание без обезвоживания и термической сушки в виде эмульсии и использование выделяющегося тепла для производственных целей

Все перечисленные способы переработки шламов требуют определенных капитальных и эксплуатационных затрат, однако в условиях возрастающего дефицита и значительного удорожания топлива эти затраты могут оказаться целесообразными Выбор способа переработки зависит от качества шлама и состава содержащихся в нем нефтепродуктов и механических примесей В частности, процесс отстаивания нефтяных шламов подробно изучен на Киришском НПЗ Шламы из различных очистных сооружений завода (исключая шламы, длительно хранящиеся в накопителях) в течение 3 ч отстаивания достаточно хорошо разделяются на три слоя: эмульсионный (нефтепродукт); донный осадок с 10-15% органических веществ; водный, незначительно загрязненный нефтепродуктом и механическими примесями. В эмульсионном слое содержание нефтепродукта составляет в среднем 62,5%, воды – 35%, остальные 2,5% – механические примеси.

Нефтяные шламы, образующиеся на НПЗ, рекомендуется предварительно разделять. Водный слой, загрязненный нефтепродуктами, нужно откачивать на очистные сооружения, верхний эмульсионный слой, близкий по составу к «ловушечной» нефти, – подавать в ловушечные резервуары и перерабатывать вместе с этой нефтью; нижний слой (донный осадок) – утилизировать Для разделения нефтяного шлама можно применять центрифугирование, подогрев, а также добавлять в него деэмульгаторы

В настоящее время изучается возможность применения твердых нефтяных отходов (шламов и нефтяной грязи) для приготовления диспергированных активированных эмульсионных топливных смесей в аппаратах УДА (универсальных дезинтеграторах-активаторах), в которых одновременно осуществляются диспергирование, смешение и активация компонентов смеси с изменением их некоторых физико-химических свойств Опыты показали, что после обработки в подобных аппаратах некоторые шламы можно использовать в качестве котельного топлива непосредственно или в смеси с топочным мазутом Диспергированию в УДА были подвергнуты, кроме того, смесь нефтяных шламов и нефтегрязи из заводского пруда-накопителя (верхний слой), а также среднесуточная проба шлама от отдельных процессов и пена, образующаяся в заводских очистных сооружениях (табл 2.6).

Полученные топливные смеси можно добавлять в заводское котельное топливо (влажностью до 10%), а также использовать отдельно в качестве заводского топлива без ухудшения процесса горения в трубчатых печах

Дополнительно размельченное твердое топливо лучше перемешивается с воздухом, что, в свою очередь, сокращает время сгорания топлива и позволяет уменьшить избыток воздуха без ухудшения полноты сгорания Вода активно участвует в процессе горения, поэтому ее нельзя считать инертным веществом При сжигании эмульсии значительно уменьшается как количество образующегося углерода, так и количество токсичных соединении в дымовых газах При обработке подобных эмульсий в дезинтеграторе особенно важна возможность введения в них присадок, уменьшающих коррозию аппаратуры и связывающих серу

Таблица 2 6 Состав и качество шламов после обработки их в УДА

Диспергированные топливные смеси	Влажность, %	Зольность, %	Дисперсность, мкм	Теплота сгорания, Мдж/кг
Смесь шламов из пруда-накопителя (верхний слой после длительного хранения)	7,3	4,16	10-12	36,4
Среднесуточная проба шлама (смесь отходов производства)	49,7	0,32	8-10	19,4
Шлам из шламонакопителя и среднесуточная проба шлама (50.50)	28,5	2,41	5-10	27,4
Пена с очистных сооружений и мазут марки 40 (50 50)	47,0	0,5	-	19,0

2.3.Прогнозирование развития замкнутых систем

Для перехода предприятий химической промышленности на замкнутую схему водного хозяйства на данном временном уровне могут потребоваться более ресурсоемкие и дорогие методы и схемы очистки, а следовательно, привлечение значительно больших материальных, трудовых и финансовых затрат Это, в свою очередь, делает необходимым прогнозирование развития замкнутых систем, а также затрат на их осуществление

Мощность замкнутой системы может быть охарактеризована объемом воды, функционирующей в ней Для прогнозирования развития методов очистки сточных вод и замкнутых систем водного хозяйства химической промышленности можно использовать ряд данных

Прогноз объемов воды, функционирующей в замкнутых системах, можно осуществлять на основании выполненных и взаимоувязанных про-

гнозов объемов валового водопотребления, оборотно-повторного водоснабжения при заданных темпах его развития, потребления свежей воды, валового водоотведения и сбрасываемых в водные объекты сточных вод Для расчетов используют фактические данные о развитии замкнутых систем на базовый период и данные на текущие 5 лет Ограничивающие условия следующие

$$V_{зам} \le V_{об} \le V_{в\,о}; \qquad V_{сб} + V_{об} = V_{в\,о},$$

где $V_{зам}$ – объемы воды, возвращаемые в замкнутые системы, $V_{об}$ – объемы воды, находящиеся в оборотно-повторных системах, $V_{в\,о}$ – объемы валового водоотведения, $V_{сб}$ – объемы сбрасываемых сточных вод

Условно внедрение оборотно-повторного водоснабжения на вновь вводимых предприятиях до появления возможности перехода на замкнутую систему можно назвать «традиционно возможным» Тогда результат перехода на замкнутую систему водного хозяйства условно можно охарактеризовать как увеличение объемов, возвращаемых в системы оборотно-повторного водоснабжения, и назвать «сверхтрадиционно возможным»

Объемы, возвращаемые в замкнутые системы, можно представить как сумму объемов, возвращаемых в «традиционные» ($V_{т\,об}$) и «сверхтрадиционные» ($V_{с\text{-}т\,об}$) оборотно-повторные системы·

$$V_{зам} = V_{т\ об} + V_{с\text{-}т\ об}.$$

Для определения объемов воды, возвращаемой в замкнутые системы, используют следующую методику расчета

Для базового временного уровня находят разность объемов оборотно-повторного водоснабжения и объемов, находящихся в замкнутых системах (V_1)·

$$V_1 = V_{об} - V_{зам}.$$

Эта разность соответствует объему воды, возвращаемой в «традиционные» системы оборотно-повторного водоснабжения, и характеризует достигнутый уровень развития этих систем на предприятиях отрасли, за исключением тех, где уже реализованы замкнутые системы водного хозяйства

Максимальная доля объемов (δ_{max}), отводимых в «традиционные» оборотно-повторные системы, в объемах валового водоотведения для каждого конкретного вида промышленности на определенном этапе является постоянной. Поэтому на следующем этапе работы находят максимальное значение этой доли; его определяют методом экспертной оценки или принимают по результатам анализа соответствующих публикаций или из накопленного опыта Это позволит определить ту часть объемов воды V_2, которая находится в «традиционных» системах оборотно-повторного водоснабжения водного хозяйства предприятий, работающих по замкнутым схемам

$$V_2 = \delta_{max} \cdot V_{зам}.$$

Сумма V_1 и V_2 соответствует объемам воды, находящимся в «традиционных» системах оборотно-повторного водоснабжения

$$V_{т\ об} = V_1 + V_2.$$

Затем определяют долю объемов воды, функционирующих в «традиционных» системах оборотно-повторного водоснабжения. Исходя из полученного увеличения доли объемов воды, находящихся в «традиционных» оборотно-повторных системах, задаются изменением этой доли от рассчитанной величины на конец базового срока (5-10 лет) до максимального значения в перспективе и определяют эти объемы

Разность объемов оборотно-повторного водоснабжения и объемов традиционного оборотно-повторного водоснабжения даст *объемы воды которые должны быть замкнуты,* т е отведены в «сверхтрадиционные» оборотно-повторные системы Используя эти объемы и зная долю традиционного оборотно-повторного водоснабжения в объемах валового водоотведения, можно рассчитать *объемы воды, функционирующей в замкнутых системах,* по формуле

$$V_{зам} = V_{т\ об} \cdot (1 - \delta),$$

где δ – доля объемов воды

Расчеты повторяют для каждого временного уровня и проверяют соблюдение ограничивающих условий Описанная методика позволяет прогнозировать развитие замкнутых систем водообеспечения при минимальной информации

Для долгосрочного планирования дальнейшего развития замкнутых систем водообеспечения важную роль играют схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов; эти схемы представляют собой внестадийные проектные документы, определяющие масштабы, очередность и экономику водохозяйственного строительства, а также необходимость и очередность строительства сооружений, связанных с охраной водных объектов от истощения и загрязнения

На основании разработок технических мероприятий и их экономической оценки могут быть созданы комплексные целевые программы, в которых должна быть предусмотрена система конкретных организационных, технических, экономических и других водоохранных мероприятий, в том числе и создание замкнутых систем водного хозяйства на предприятиях отдельных объединений или химической промышленности в целом

Основываясь на разработке комплексных целевых программ, формируют единый перспективный план, состоящий из 1) плана, формируемого в соответствии с мероприятиями комплексных целевых программ регионов, бассейнов рек, их участков, 2) плана, учитывающего использование внепрограммных мероприятий, основанных на изучении материалов по отраслям промышленности, а также технико-экономических докладов и обоснований В перспективе представляется возможным полностью перейти на долгосрочное планирование, основанное на системе комплексных целевых программ с учетом специфики водоохранной деятельности,

носящей как отраслевой, так и межотраслевой характер

При реализации комплексных и целевых водоохранных программ должны быть достигнуты определенные физико-химические и биологические характеристики воды, сохранены минимально допустимый расход или объемы ее в водном объекте Осуществление программы использования водных ресурсов даст возможность удовлетворить потребность в воде за счет изъятия допустимых количеств воды, не истощающих водный объект, а также рационально использовать этот объект без изъятия воды, не нарушая водоохранных требований. Комплексные целевые программы должны быть рассчитаны на достижение наивысшего социального, экономического и экологического эффекта от охраны поверхностных и подземных вод Они определяют планы по совершенствованию системы управления водоохранной деятельностью, содержат рекомендации по размещению производительных сил, совершенствованию правовой охраны вод. Эти программы могут иметь межотраслевой, межрегиональный, межобластной характер; они должны объединять, координировать и направлять деятельность различных ведомств, предприятий, органов управления

При подготовке комплексной целевой программы по созданию замкнутых систем водообеспечения на первом этапе планируют всю совокупность мероприятий, оформляя соответствующие документы На втором этапе проводят научно-исследовательские, опытно-конструкторские работы, а также работы по изготовлению и монтажу оборудования, ведут строительство сооружений, осуществляют пуск и наладку систем, их испытания и сдачу в эксплуатацию.

Глава 3

Очистка сточных вод и пути ее реализации

3.1. Анализ существующих схем очистки сточных вод

Технологические схемы очистки сточных вод – это комплексы сооружений, предназначенных для извлечения из сточных вод примесей, опасных в санитарном отношении или ценных как вторичное сырье В настоящее время существует большое многообразие технологических схем Выбор комплекса сооружений и установление эффективного режима его работы обычно представляют определенные трудности, обусловленные множественностью путей достижения требуемого качества очищенной воды Так, для флотации* сточных вод кожевенных заводов в сочетании с коагуляцией применяются напорные установки Различают прямую флотацию, флотацию с частичной перекачкой воды, флотацию с рециркуляцией и флотацию с рабочей жидкостью

Технологические схемы очистки сточных вод, основанные на применении седиментационно-флотационных методов и коагуляции, включают в себя узлы удаления грубодисперсных примесей жира методами флотации и отстаивания, узлы перевода примесей в нерастворимые соединения путем коагуляции ионами железа с добавкой извести для корректировки величины pH, узлы удаления коагулированных примесей флотацией или отстаиванием и доочистки воды фильтрованием через зернистые материалы, а также узлы кондиционирования осадков обезвоживанием на вакуумфильтрах

Среди существующих технологических схем очистки сточных вод особое место занимает биологическая очистка с использованием активного ила

Биохимические установки различают по классификационным признакам спорадический–постоянный, аэробный–анаэробный, криофильный (20°С) –мезофильный (20-40°С) –термофильный (50-60°С), одноступенчатый–многоступенчатый, смешанная микробная культура–селекционная монокультура (либо стерильная ферментация), одностадийный распад–распад продуктов стоков в несколько этапов, естественная аэрация–принудительная аэрация различной интенсивности, схема с возвратом биошлама–схема с задержанием или возвратом биошлама, естественное перемешивание–принудительная гомогенизация, протекание жидкости в трубчатом реакторе–в реакторе гомогенного смешения

Возможны различные варианты комбинированных методов Типовая схема биологической очистки приведена на рис 3 1

* Флотация – процесс молекулярного прилипания частиц твердого материала к поверхности раздела двух фаз, обычно газа (чаще воздуха) и жидкости, обусловленный избытком свободной энергии поверхностных пограничных слоев, а также поверхностными явлениями смачивания

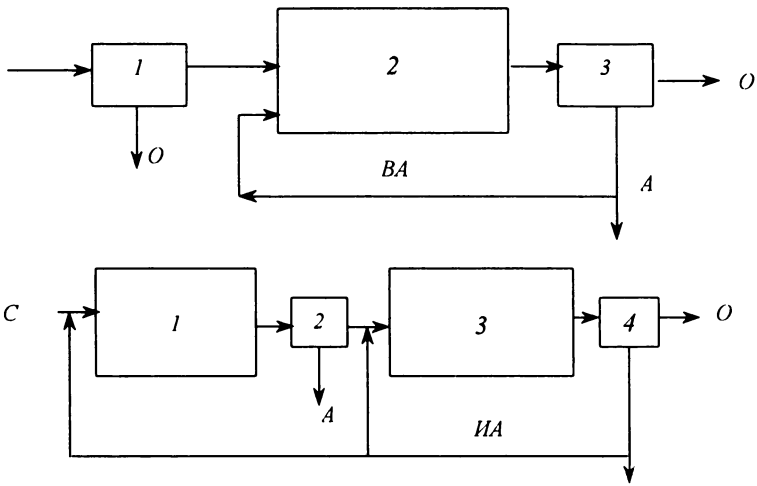


Рис 3.1. Типовая схема биологической очистки сточных вод:
1 – первичный отстойник, *2* – аэротенк, *3* – вторичный отстойник, *СВ* – сточная вода, *ОВ* – очищенная вода, *ВАИ* – возвратный активный ил, *АИ* – активный ил, *О* – осадок

Рис 3.2 Модифицированная схема биологической очистки сточных вод
1 – преаэратор, *2,4* – отстойники, *3* – аэротенк, *ИАИ* – избыточный активный ил

Здесь сточная вода после механической очистки подается в первичный отстойник, а затем в аэротенк

Смесь активного ила и очищаемой жидкости после аэротенка попадает во вторичный отстойник, из которого часть ила возвращается затем в аэротенк, а осветленная вода направляется на обезвреживание

На рис 3 2 показана схема очистки сточных вод с преаэратором (встроенные сооружения в первичных отстойниках для снижения загрязнений в отстоенной сточной воде сверх обеспечиваемого первичными отстойниками). По этой схеме в преаэратор перед первичным отстойником направляют избыточный активный ил При этом вынос активного ила из первичного отстойника компенсирует ту часть циркулирующего ила, которая направлялась в преаэраторы Осветленная сточная жидкость поступает из первичного отстойника в аэротенк, где очищается вместе с циркулирующим активным илом, а затем осветляется во вторичном отстойнике Из-за уменьшения объема, а главное – из-за низких значений удельного сопротивления осадка потребность реагентов на последующее механическое обезвреживание сокращается

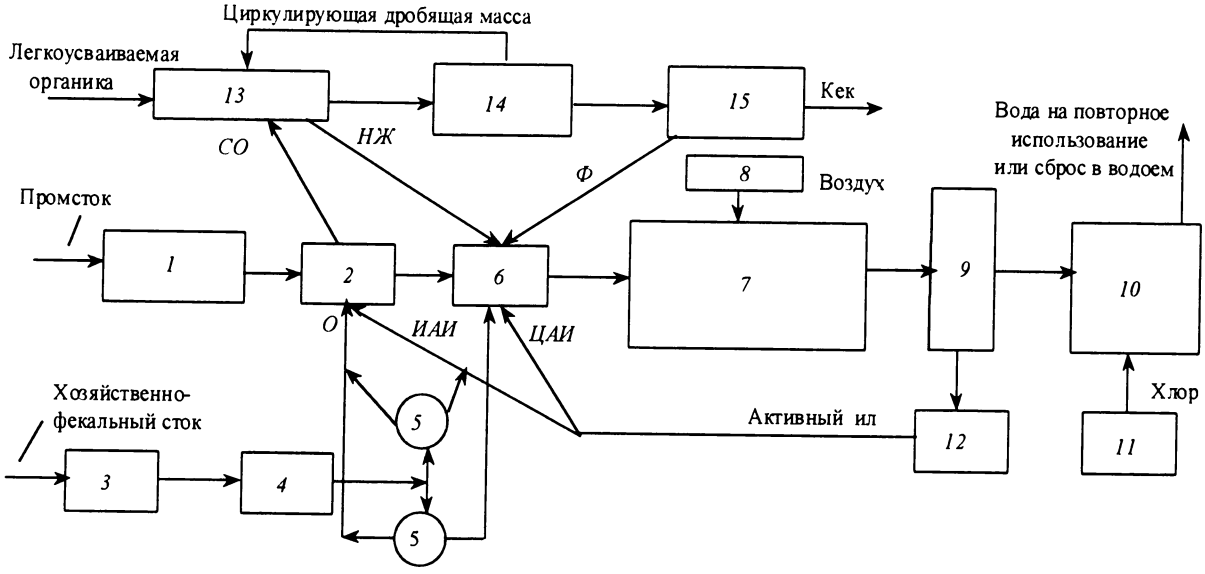


Рис 3.3 Технологическая схема сорбционно-анаэробного метода обезвреживания малоконцентрированных промышленных сточных вод
1 – усреднитель промстоков, *2* – сооружение сорбционной обработки промстока осадками, *3* – решетки, *4* – песколовки; *5* – отстойники, *6* – смеситель, *7* – аэротенки; *8* – воздуходувка; *9* – блок флотационного или гравитационного отделения активного ила, *10* – блок доочистки стоков, *11* – хлораторная, *12* – иловая насосная станция, *13* – биовосстановители; *14* – метантенки; *15* – блок кондиционирования, обезвоживания и сушки осадков сточных вод; *СО* – сорбционный осадок; *НЖ* – надиловая жидкость, *Ф* – фильтрат; *О* – осадок, *ИАИ* – избыточный активный ил; *ЦАИ* – циркуляционный активный ил

Для малоконцентрированных промышленных стоков (с концентрацией токсичных соединений до 50 мг/л) более приемлемой является технологическая схема, основанная на использовании сорбционных свойств сырых осадков хозяйственно-фекальных сточных вод и избыточного активного ила (рис 3 3)

Здесь сточные воды, поступающие на очистную станцию, разделяются на два потока промстоки и хозяйственно-фекальные стоки Промстоки проходят усреднитель *1*, сооружение сорбционной обработки промстока осадками *2* и подаются в смеситель *6* Сюда же подаются хозяйственно-фекальные стоки через решетки *3*, песколовки *4* и отстойники *5*

Для очистки сточных вод, которым свойственны колебания технологической нагрузки, Б Репин и В.Баженов предложили двухступенчатую схему управляемых аэротенков (рис 3 4) В комплекс сооружений с предлагаемой технологией входят аэротенки двух ступеней (АЭ-I и АЭ-II), илоуловитель (УЛ), вторичный отстойник (ВО), илоуплотнители (УП) Кроме того, АЭ-I снабжен специальными регенераторами (Р), которые при выходе на управляемые режимы способны работать в качестве реактиваторов (РА), т е временно выполнять функции дополнительного аэротенка Гидравлическая связь между АЭ-I и РА осуществляется с помощью форкамер (ФК), в которых создается эрлифтный эффект и внутренний циркуляционный поток иловой смеси, а также происходит насыщение его кислородом и, кроме того, проводится предварительная (сорбционная) очистка части сточной жидкости

В период увеличенного притока сточных вод кроме постоянно действующей аэрации включают управляемые системы аэрации первого или обоих уровней, в результате чего циркуляционный поток иловой смеси через ФК поступает в начало АЭ-I из Р, которые начинают работать в режиме РА Подача значительного количества насыщенной кислородом иловой смеси из РА в АЭ-I через ФК обусловливает рецикл аналогичного количества иловой среды из АЭ-I, которые соединены по принципу сообщающихся сосудов. В результате образуется первый управляемый контур рециркулирующей биомассы, расход которой в 3-5 раз превышает приток сточной жидкости, а рабочий объем АЭ-I как бы возрастает вдвое Одновременно происходит ступенчатое увеличение концентрации активного ила в рабочей зоне сооружения При этом чем точнее ступенчатый график управления окислительной способностью аэротенка соответствует графику колебания поступающей нагрузки, тем меньше потери электроэнергии и тем выше технико-экономические показатели системы

Удельные нагрузки на ил (по $БПК_{полн}$) между ступенями очистки распределяются следующим образом (в мг на 1 г ила за сутки) I ступень – 800-1000, П ступень – не более 100-150 Объем УЛ рассчитан на пребывание в нем иловой смеси в течение 15-20 мин Наличие УП, так же как и АЭ-II, необходимо только в случае труднооседающих илов и при очистке городских сточных вод не требуется.

Таким образом, основные трудности осуществления оптимального режима очистки в традиционных аэротенках, вызванные значительными колебаниями нагрузки, могут быть успешно преодолены путем использования аэротенков управляемого технологического профиля В настоящее

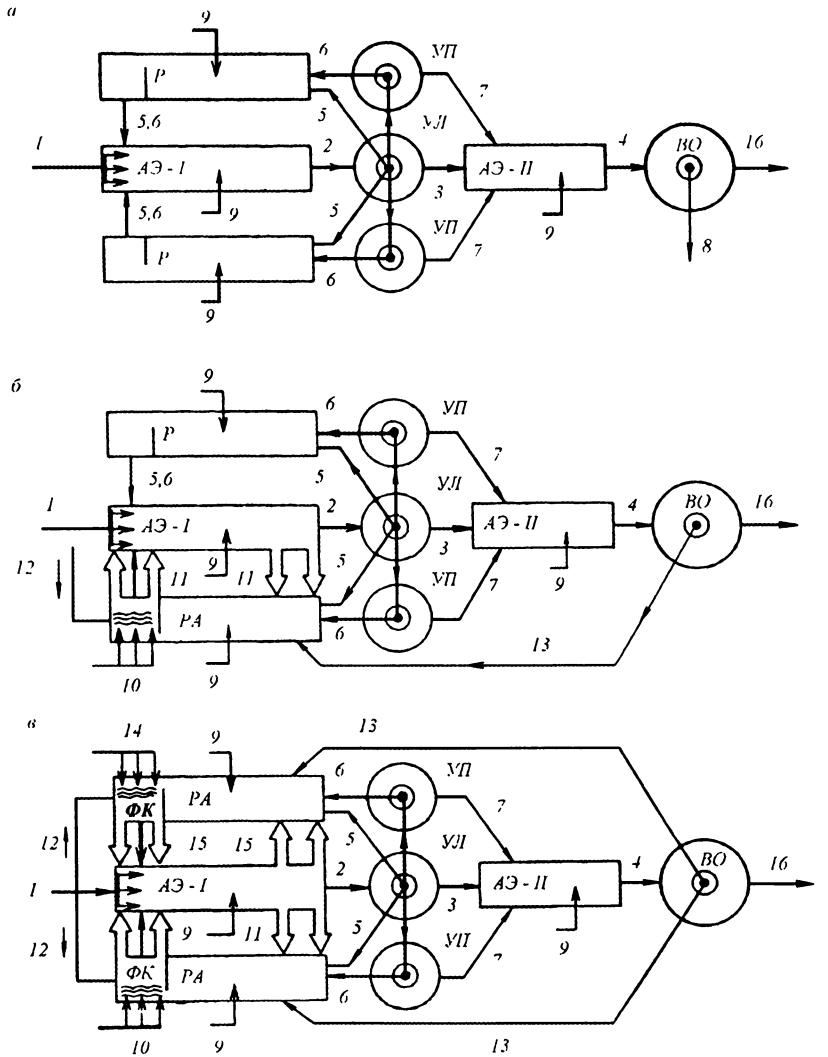


Рис 3 4 Технологическая схема работы управляемого аэротенка при минимальном (*а*), увеличенном (*б*) и максимальном (*в*) объеме поступления загрязняющих веществ

1 – исходная сточная вода, *2* – иловая смесь 1-й ступени очистки, *3* – осветленная вода 1-й ступени очистки, *4* – иловая смесь II-й ступени очистки, *5* – неуплотненный возвратный ил, *6* – уплотненный возвратный ил, *7* – иловая вода, *8* – избыточный ил, *9* – постоянно действующая аэрация, *10* – управляемая аэрация первого уровня, *11* – управляемый иловый рецикл первого уровня, *12* – подача исходного стока в ФК, *13* – возвратный ил II-й ступени, *14* – управляемая аэрация второго уровня, *15* – управляемый иловый рецикл второго уровня, *16* – осветленная вода II-й ступени очистки

время данная технология получает широкое распространение в практике проектирования Ведется строительство ряда промышленных объектов, в том числе самых крупных управляемых аэротенков этой серии производительностью свыше 100 тыс $м^3$/сут

Анализируя рассмотренные технологические схемы очистки сточных вод, необходимо отметить, что существует большое разнообразие механических, физико-химических, биохимических очистных сооружений При их проектировании закладываются в основном одни и те же узлы и элементы в различных сочетаниях и комбинациях

Сточные воды многокомпонентны по своему составу, и для их очистки применяются различные методы с многочисленными вариантами их сочетания При этом каждый метод очистки предусматривает использование нескольких аппаратов, соединенных между собой разнообразными потоками и рециклами В свою очередь для каждого аппарата, каждого сооружения требуется организация «своих» потоков, «своих» режимов работы и т д Учитывая это можно сказать, что без построения многовариантной

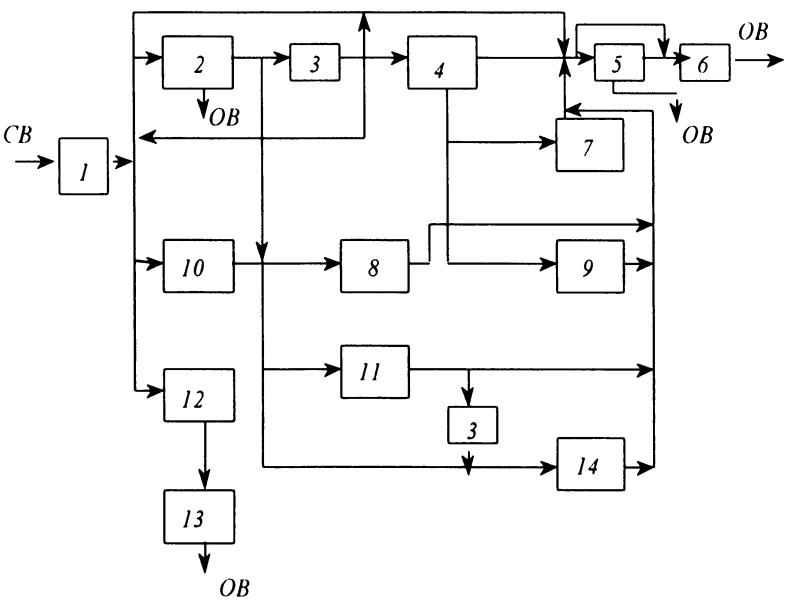


Рис 3 5 Обобщенная технологическая схема очистки сточных вод

1 – механическая очистка, *2* – отстаивание, *3* – коагулирование, фильтрация, *4* – адсорбция, *5* – хлорирование, *6* – отстаивание в прудах, *7* – электродиализ, *8* – флотация, *9* – ионный обмен, *10* – нейтрализация, *11* – фильтрация, *12* – термическое обезвреживание, *13* – абсорбция, *14* – полная биологическая очистка, *СВ* – сточная вода, *ОВ* – очищенная вода

технологической структуры невозможно осуществить синтез оптимальных схем водоочистки

В настоящее время накоплен определенный опыт по интенсификации действующих очистных сооружений путем многовариантного перебора параметров их работы по существующим методам расчета, в результате выбирается совокупность оптимальных параметров, при которых обеспечивается наиболее высокая производительность

Рассмотренные выше узлы и различные схемы водоочистки используются при синтезе комплексных технологических схем. Структуру комплексной схемы строят на основе существующих схем, комбинируя элементарные операции. Классическим примером биологической очистки сточных вод является последовательность: осаждение–очистка активным илом–осаждение–дезинфекция. Третичная очистка в известном способе используется, чтобы удалить оставшиеся азот и фосфор

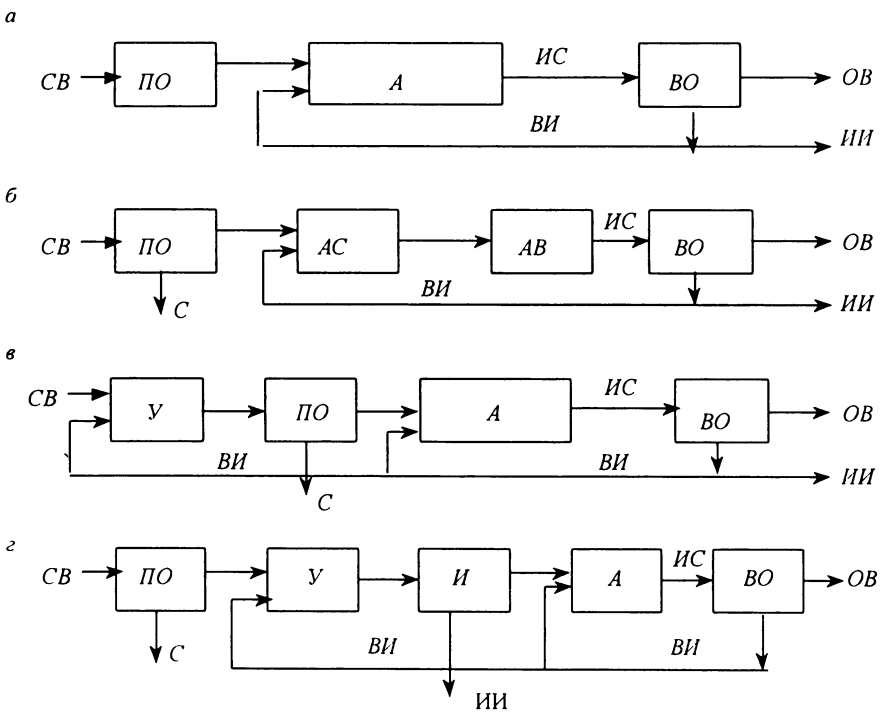


Рис 3 6 Варианты (*а -г*) одноступенчатых схем очистки сточных вод

ПО – первичный отстойник, *А*– аэротенк, *ВО* – вторичный отстойник, *АС*– аэротенк-смеситель, *С* – сброс ила, *АВ* – аэротенк-вытеснитель; *У* – усреднитель, *И* – илоотделитель, *С* – сброс ила, *ВИ* – возвратный ил, *ИИ* – избыточный ил, *ИС* – иловая смесь

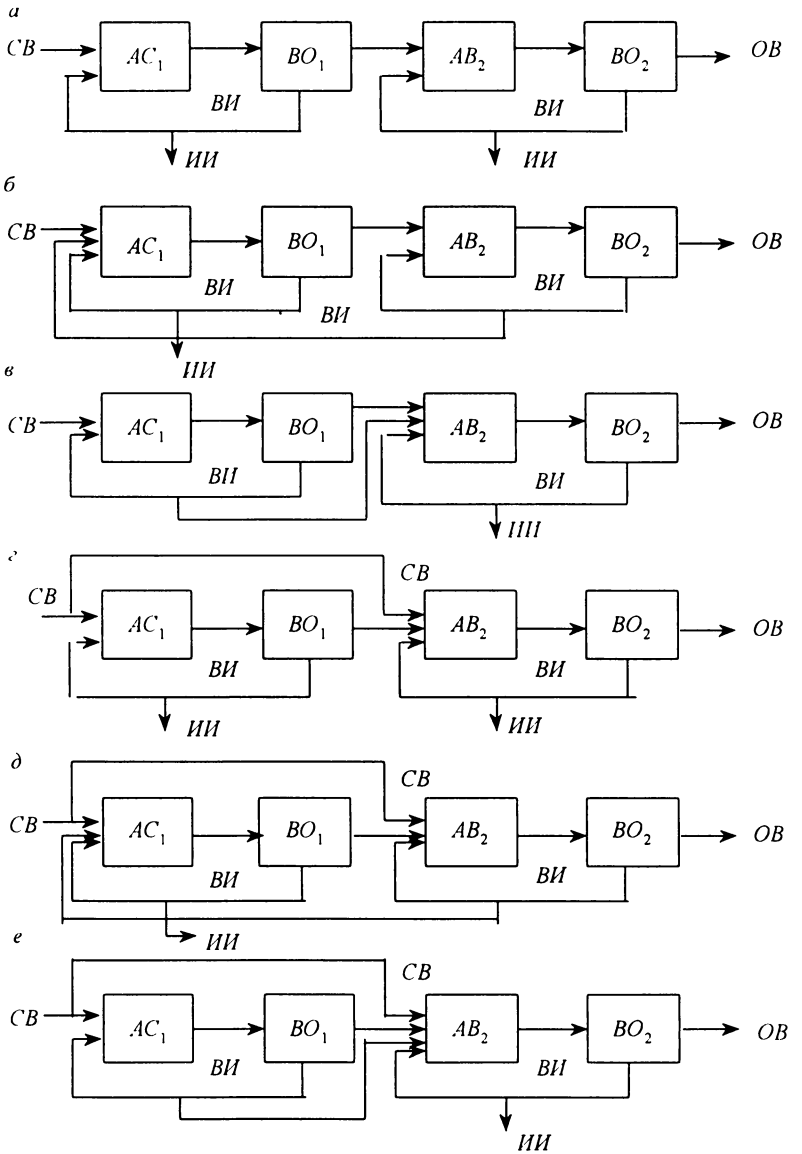


Рис 3 7 Различные варианты схем (*а - е*) двухступенчатой очистки сточных вод
AC_1 - аэротенк-смеситель I-й ступени; BO_1, BO_2 - вторичные отстойники I-й и II-й ступеней, AB_2 - аэротенк-вытеснитель II-й ступени

Совокупность вариантов схем, наиболее распространенных в практике проектирования, можно представить в виде обобщенной схемы (рис 3 5) Эта схема построена на основе блоков и узлов и может быть расширена Так, элемент *14* обозначает полную биологическую очистку, а ее можно представить, в свою очередь, как систему аппаратов, сооружений и агрегатов. Структура таких схем зависит от расхода сточной воды, состава и концентрации примесей, требований к качеству очищенной воды и от других факторов В состав этих схем могут входить аэротенки с механической аэрацией и пневматической аэрацией, аэротенки коридорные с сосредоточенной подачей сточной воды и активного ила либо аэротенки с рассредоточенной подачей активного ила и сточной воды Технологическая схема очистной станции может быть многоступенчатой, т е состоять из комбинации перечисленных аэротенков Наиболее широко применяются одноступенчатые установки (рис 3 6)

Если в сточной воде содержатся различные группы органических соединений, скорости биологического окисления которых сильно различаются, целесообразно применять двухступенчатые и многоступенчатые схемы биологической очистки (рис 3 7)

Таким образом, обобщенная схема (см рис 3 5) включает в себя различные варианты схем и как бы состоит из отдельных блоков, каждый из которых представляет собой совокупность отдельных аппаратов, сооружений. Эта схема может быть преобразована в более простые, в зависимости от их назначения. Например, цепочка *1-14-5-6* схемы предусматривает наличие механической очистки, полной биохимической очистки, хлорирование и отстаивание в прудах, а цепочка *1-14-3-4-5* предусматривает механическую очистку, полную биологическую очистку, коагулирование, адсорбцию и хлорирование. По мере совершенствования систем водоочистки эта схема может быть дополнена и модернизирована

3.2. Основные принципы биохимической очистки

Очистка сточных вод при современных масштабах промышленного производства представляет собой сложную научно-техническую задачу Это связано, прежде всего, с тем, что сточные воды содержат множество разнообразных примесей, подлежащих обезвреживанию Кроме того, объемы водопотребления на бытовые и технические нужды настолько велики, что для крупного промышленного центра могут достигать 1 млн $м^3$/сут и более В связи с этим становится актуальной проблема поиска эффективных методов очистки сточных вод, позволяющих производить их сброс в водоемы при полном соответствии требованиям действующих санитарных норм.

Важное место среди существующих методов очистки промышленных и бытовых стоков занимает биологическая очистка Этот метод основан на способности микроорганизмов утилизировать в качестве питательных веществ органические соединения, растворенные в сточных водах Потребление органики может происходить как в присутствии кислорода (аэробная очистка), так и в его отсутствие (анаэробная очистка) Методы аэроб-

ной очистки получили наиболее широкое распространение, хотя для них требуются большие количества воздуха или кислорода.

Сооружение сложных инженерно-технических комплексов (отстойники, аэротенки, пруды доочистки и т д) требует значительных инвестиций, поэтому в данном случае очень важной становится оптимизация процесса проектирования При этом особое внимание уделяется мероприятиям по уменьшению загрязнений промышленных сточных вод, методам очистки, внедрению новых безотходных технологий и замкнутых систем водообеспечения

Проблема водной токсикологии не представляется неразрешимой, однако, для принципиального решения вопроса о пригодности и об эффективности того или иного метода очистки и для разработки соответствующих технологических схем водопользования необходимо их систематическое экспериментальное изучение

Надежные методы расчета очистных сооружений, отвечающие современному уровню производства, могут быть разработаны только с привлечением новейших методов моделирования, суть которых заключается в исследовании объектов и прогнозировании их поведения по результатам наблюдения за моделями этих объектов В зависимости от типа моделей различают два вида моделирования. физическое и математическое, которые взаимно дополняют друг друга Роль и значимость физического моделирования в настоящее время существенно изменились. Ранее этот вид моделирования использовался как самостоятельный метод исследования объектов, но он предполагает проведение весьма сложных и длительных экспериментов

При математическом моделировании круг решаемых задач коренным образом изменяется Применительно к столь сложным процессам, как биологическая очистка, состоящим из большого числа различных по своей природе стадий, разработка адекватных математических моделей и их практическое использование возможны только на основе системного подхода

3.2.1. Роль микроорганизмов

Микроорганизмы распространены во всех частях биосферы (в воде, воздухе и в почве), в 1 $см^3$ почвы, например, их содержится до 100 миллионов. Этот факт уже сам по себе свидетельствует о той важной роли, какую играют микроорганизмы в биосфере и в человеческой деятельности Роль микроорганизмов заключается в их способности осуществлять биохимические превращения почти всех органических веществ естественного происхождения, включая и те, которые находятся в растворенном состоянии в воде Эти превращения связаны в один комплекс со сложными последовательными реакциями, протекающими при участии специфических катализаторов белковой природы – ферментов С биохимической точки зрения ферментация – особая категория биохимических превращений органических веществ (субстратов), совершаемых в результате жизнедеятельности микроорганизмов

При подходящих условиях микроорганизмы растут, размножаются, перерабатывают органические вещества, используя их в качестве пищи, и выделяют в окружающую среду разнообразные конечные продукты

Процессы минерализации органической материи (превращения ее в неорганические вещества) в зависимости от условий (среды) и вида микроорганизмов разделяются на две большие группы – аэробные и анаэробные По этому же принципу подразделяются на два вида и способы биологической очистки сточных вод

Промышленное применение микроорганизмов заключается в управлении процессом биохимического превращения органических веществ при участии микроорганизмов и ферментов

Одним из наиболее типичных примеров промышленного применения микроорганизмов – биохимическая очистка сточных вод Органические вещества, содержащиеся в бытовых и промышленных сточных водах, являются благоприятной средой для микроорганизмов, которые в ней быстро размножаются, используя часть пищи для синтеза новых клеток, а другую перерабатывая в простые минеральные продукты – CO_2, H_2O и др Этот процесс, протекающий в присутствии кислорода (воздуха), называется «биохимическим» окислением.

До биохимического окисления сточные воды подвергаются механическому очищению (осаждению). В осадках, образующихся в результате механического и биохимического очищения сточных вод, органические вещества минерализуются затем чаще всего за счет анаэробных биохимических процессов

Механизм изъятия органических веществ из сточных вод и их переработки микроорганизмами очень сложен и полностью не изучен. Согласно современным теориям его можно описать тремя последовательными стадиями

– массообмен и сорбция субстрата на поверхности микроорганизмов;
– диффузия субстрата через клеточную мембрану микроорганизмов,
– метаболизм субстрата в клетках

Суспендированные вещества и крупные молекулы в растворе надо заранее разрушить, чтобы они могли легко проходить сквозь клеточную оболочку. Это разрушение происходит при помощи ферментов, выделяемых бактериями

Возможны два пути переноса вещества от поверхности внутрь клетки

1) последовательное растворение вещества в оболочке клетки и цитоплазматической мембране, благодаря чему оно диффундирует внутрь клетки,

2) присоединение транспортируемого вещества к специфическому белку-переносчику, находящемуся в мембране, дальнейшее превращение комплекса вещество–переносчик в растворимое состояние, диффузия комплекса через мембрану в клетку, где комплекс распадается и белок-переносчик высвобождается для совершения нового цикла

Основную роль в очистке сточных вод играют процессы превращения вещества, происходящие в клетках микроорганизмов, а именно окисление вещества, сопровождающееся выделением энергии, и синтез новых белковых веществ, протекающий с затратой энергии

При потреблении микроорганизмами питательных веществ, содержащихся в сточных водах, в микробной клетке одновременно протекают два взаимосвязанных процесса – синтез протоплазмы и окисление органических веществ (на окисление клетка потребляет кислород, растворенный в сточной жидкости)

Скорость потребления кислорода активным илом зависит от многих взаимосвязанных факторов. концентрации микроорганизмов и простейших в активном иле, скорости их роста и физиологической активности, концентрации и состава питательных веществ, поступающих с загрязненным потоком, а также от содержания кислорода в среде и условий аэрации в аэротенке

В процессе биоокисления органических веществ микроорганизмами важнейшую роль играет транспорт кислорода в системе газ–жидкость–клетка, в связи с чем процессы массопередачи и гидродинамики в аэротенках являются основополагающими

3.2.2. Способы реализации биологической очистки

Биологическая очистка сточных вод в основном осуществляется в *аэротенках* и *биофильтрах*. Основное различие между этими типами очистных сооружений заключается в способе культивирования микроорганизмов В аэротенках микроорганизмы находятся в суспендированном (свободно плавающем) состоянии в виде бактериальных флоккул В биофильтрах микроорганизмы «фиксированы» на поверхности инертных материалов и образуют на нем биологическую пленку Такой способ очистки широко используются на предприятиях легкой, пищевой, мясомолочной и других отраслей промышленности для очистки как производственных сточных вод, так и их смесей с хозяйственно-бытовыми стоками

Аэротенки. Возможность очистки сточных вод в аэротенках впервые была установлена в 1887 г английским химиком К Дидзином, который писал « правильное направление в очистке сточной жидкости состоит в том, чтобы сначала выделить осадок, а затем к осветленной жидкости прибавить разводку специфических организмов, специально культивируемых для этой цели; потом выдержать жидкость в течение достаточного времени, энергично ее аэрируя и, наконец, спустить в реку» Таким образом, основные принципы биохимической очистки были известны уже в конце XIX в

Начало практического внедрения аэрационных сооружений относится к 1914—1916 гг , когда Адерн и Локетт впервые изложили сущность биохимического метода очистки сточных вод *Коридорный аэротенк* с пневматической аэрацией, или *аэротенк Херда,* окончательно сложился как сооружение в начале 1920-х гг и с тех пор почти не подвергся изменениям, и в наши дни он является основным сооружением на станциях аэрации многих городов и промышленных предприятий.

Существенный недостаток технологической схемы коридорного аэротенка состоит в том, что при залповом поступлении сточных вод, содержащих высокие концентрации производственных загрязнений, а также токсичные примеси, возможно резкое нарушение жизнедеятельности ак-

тивного ила и даже его гибель В обоих случаях нормальная работа коридорного аэротенка нарушается на длительное время Аэротенки, свободные от указанного недостатка, были созданы профессором Н А Базякиной в 1930-е гг Так появились *аэротенки-смесители,* или а*эротенки с децентрализованной подачей сточной жидкости и активного ила.*

Прогресс, достигнутый в области биохимической очистки городских сточных вод, побудил исследователей искать пути более широкого использования данного метода для очистки производственных сточных вод В 1934 г. три исследовательские группы (в Москве, Эссене и Магдебурге) опубликовали данные о способности фенола к биохимическому окислению, при этом отмечалась роль фосфорсодержащих соединений в культивировании биофлоры Группа ученых из Магдебурга независимо доказала, что очистка активным илом сточных вод, содержащих фенол, возможна при добавлении «фосфора» без разбавления их бытовыми сточными водами Очистка в этом случае происходит под действием спонтанно возникающей флоры Так был разработан метод биогенной, в частности фосфорной, подпитки, значительно расширивший диапазон применения биохимической очистки

В конце 1940-х гг А. Калински (США) предложил совместить в одном сооружении аэротенк и вторичный отстойник, что позволило заметно интенсифицировать процесс биохимической очистки сточных вод *Аэротенк-отстойник с пневмомеханическим аэратором* получил название *аэроакселератор;* он нашел широкое практическое применение для очистки малых и средних количеств сточных вод.

Несколько позднее (1954 г.) коллектив исследователей Академии коммунального хозяйства (АКХ) им. К. Д. Памфилова на базе обычного коридорного аэротенка разработал конструкцию *аэротенка-отстойника с пневматической системой аэрации* для очистки больших количеств сточных вод Более удачной считается конструкция аэротенка-отстойника такого типа, установленного на очистной станции Ашер в Париже Аэротенк-отстойник с верхним переливом иловой смеси в зону отстаивания и с нижней циркуляционной щелью в настоящее время успешно очищает 40 тыс $м^3$ городской сточной жидкости в сутки при продолжительности аэрации 0,8-1,5 ч.

Другое решение по совершенствованию технологического режима аэротенков-отстойников (1968 г) было предложено в работах кафедры канализации Московского инженерно-строительного института (МИСИ) Так, было доказано, что работа *аэтотенка-отстойника с механическим аэратором* может быть надежной и высокоэффективной, если организовать циркуляцию активного ила с помощью специального илопровода, нижний конец которого находится у дна конуса отстойной зоны, а верхний конец введен в зону разрежения аэратора Это было продемонстрировано на различных видах производственных сточных вод

Процесс биохимической очистки сточных вод от органических веществ в аэротенках состоит из следующих этапов

– адсорбция и коагуляция активным илом взвешенных и коллоидных частиц;

– окисление микроорганизмами растворенных и адсорбированных

илом органических соединений,

– нитрификация,

– регенерация активного ила (избыточный активный ил удаляется из сооружения)

Сточная жидкость, подаваемая в аэротенк, должна содержать не более 25 мг/л нефтепродуктов и не более 150 мг/л взвешенных веществ.

В зависимости от степени смешения поступающей сточной жидкости с жидкостью, находящейся в очистном сооружении, различают три основных типа аэротенков 1) аэротенк, в котором поступающая сточная жидкость не смешивается с жидкостью, находящейся в нем, 2) аэротенк со ступенчатым впуском сточных вод, при котором поступающая жидкость смешивается с частью жидкости, находящейся в нем, 3) аэротенки-смесители, в которых поступающая сточная жидкость смешивается со всем объемом жидкости, находящейся в аэротенке.

Конструкции аэротенков и организация потоков очищаемой жидкости и активного ила показаны на рис 3 8. *Обычные аэротенки* представляют собой открытые проточные бассейны преимущественно прямоугольной формы, оборудованные устройствами для обеспечения принудительной аэрации Такие бассейны бывают двух-, трех- и четырехкоридорного типа Глубина аэротенков не менее 3 м Концентрация загрязнений в подаваемых сточных водах должна быть не более 1200 мг/л по $БПК_{полн}$ В процессе очистки сточной жидкости в обычном аэротенке наблюдается резкая неравномерность потребления кислорода В месте введения сточной жидкости в аэротенк расход кислорода в 3 раза больше, чем на выходе Осуществление неравномерной подачи воздуха связано со значительными техническими трудностями

Скорость потребления кислорода во время очистки сточной воды изменяется ступенчато. Первоначально, в течение определенного времени, скорость почти не меняется; при этом разрушаются органические вещества, находящиеся в растворе. сначала – наиболее легко окисляющиеся, затем – остальные в последовательности, определяемой интенсивностью окисления Находящиеся в растворенном состоянии органические вещества окисляются раньше адсорбируемых активным илом. Затем скорость резко снижается, что соответствует началу нитрификации и окисления органических веществ, находящихся в иле При этом скорость окисления загрязнений бытовых вод втрое ниже, чем в первой фазе, но она остается постоянной

Количество кислорода, расходуемого на окисление органических веществ, не зависит от интенсивности аэрации Оно пропорционально высоте аэрируемого слоя жидкости и дефициту кислорода При наиболее благоприятных условиях (например, при подаче воздуха через пористые пластинки) эта величина достигает 8-10 % Количество кислорода в смеси сточная вода–активный ил, согласно экспериментальным данным, должно поддерживаться на уровне 2 мг/л Если содержание растворенного кислорода становится меньше 1,5 мг/л, процесс очистки нарушается Содержанию растворенного кислорода в очищенной жидкости придается большое значение Так, считается, что основная причина нарушения работы аэротенка заключается в недостатке кислорода в очищаемой жидкости Другие

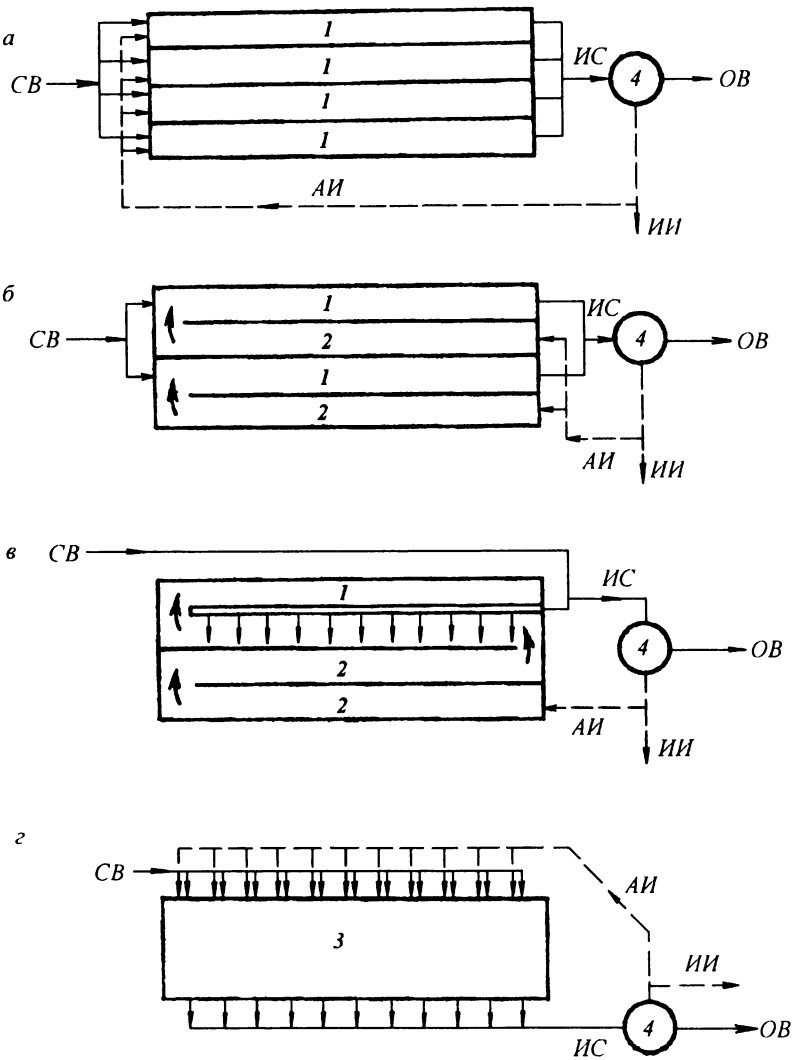


Рис 3 8 Схемы аэротенков

а – с сосредоточенным поступлением сточной жидкости, *б* – с сосредоточенным поступлением сточной жидкости и аэрацией возвратного ила, *в* – со ступенчатым впуском сточной жидкости, *г* – с рассредоточенным впуском и выпуском смеси сточной жидкости и активного ила, *1* – аэротенк, *2* – регенератор, *3* – аэротенк-смеситель, *4* – отстойник

причины – например, изменение состава сточных вод вследствие поступления в них ядовитых для ила соединений, недостаточный объем вторичных отстойников, источники загнивания внутри сооружений – имеют вторичное значение

Органические вещества, попадающие в аэротенки, распределяются между илом и жидкой фазой следующим образом в иле – 58 – 90 %, в жидкости – 42 – 10 %

Кислород, поступающий с воздухом в аэротенк, в основном расходуется на окисление органических веществ в сточной жидкости и в небольшом количестве потребляется активным илом Расход кислорода на 1 л активного ила составляет 14-36 мг/ч. Так как в аэротенке содержится около 10 %(об) ила, то расход кислорода на 1 л смеси сточной жидкости и ила составляет 1,4-3,6 мг/ч, в то время как на окисление загрязнений в 1 л сточной воды его расходуется 100 мг/ч

На стадии наибольшего расхода кислорода скорость его потребления пропорциональна концентрации активного ила (мг/л), рассчитанной на сухое вещество Необходимая степень очистки определяет среднюю скорость процесса. последняя тем меньше, чем выше степень очистки Кроме того, скорость биохимического окисления органических веществ определяется составом сточных вод

Схему (см рис 3 8) можно улучшить, используя один или два отсека (25 – 50 % объема аэротенка) в качестве регенератора активного ила Наличие регенератора дает возможность разрушать загрязнения при повышенной концентрации активного ила, что ускоряет процесс очистки и повышает производительность аэротенка. Регенератор позволяет также экономить воду, которая может погубить микроорганизмы в аэротенке В этом сооружении органические вещества окисляются в основном в иле, жидкость окисляется незначительно. После того как заканчивается разложение адсорбированных илом органических соединений, возобновляется окисление оставшихся в жидкости растворенных веществ, затем скорость окисления снова снижается. Однако ступенчатый характер потребления кислорода сохраняется

Аэротенки со ступенчатым впуском сточной жидкости (рис 3 8*в*) рекомендуется применять для очистки сточной жидкости, в которой высока концентрация загрязняющих органических веществ и особенно значительно содержание быстроокисляющихся веществ, разбавлять их при этом следует очищенной сточной водой Очищаемую сточную воду после отстаивания подают в нескольких местах по длине аэротенка Согласно исследованием ВНИИводгео, ее следует подавать в первую половину аэротенка в 4 зоны. в первую – 10 % общего объема очищаемой жидкости, во вторую и третью – по 35 % и в четвертую – 20 % Расстояние между впусками не должно превышать ширины аэротенка Жидкость в аэротенке имеет поступательное движение и активно перемешивается воздухом

Способ биологической очистки концентрированных сточных вод был усовершенствован Н.А. Базякиной, которая разработала конструкцию аэ*ротенка-смесителя* с децентрализованной подачей сточной воды и ила (после регенерации) по длине аэротенка – с одной его стороны и с децентрализованным выпуском – с другой (см. рис.3 8 *г*) Эта схема дает воз-

можность поддерживать практически одинаковую, пониженную концентрацию загрязнений во всем объеме аэротенка Поступающие сточные воды разбавляются содержимым аэротенка, что позволяет подавать в аэротенк сточные воды с высокой концентрацией загрязнений без предварительного разбавления. Возвратный активный ил регенерируется кислородом при прохождении первого аэротенка, в который он возвращается из вторичных отстойников. Поскольку окислительная и адсорбционная способность активного ила восстанавливается, длительного контакта его со сточной водой не требуется, и за короткое время (примерно 3 ч) органические соединения разрушаются и удаляются из очищаемой жидкости При очистке сточных вод по такой схеме в аэротенках не будут возникать анаэробные условия, так как потребление кислорода станет практически одинаковым во всем сооружении

Аэротенк-смеситель по сравнению с обычным аэротенком имеет ряд важных преимуществ возможность очистки сточных вод с высокой концентрацией загрязнений, равномерная подача воздуха по всей площади, постоянство скорости процессов окисления органических веществ при постоянных концентрации активного ила и температуре Равномерная подача воздуха, а следовательно, и кислорода, обеспечивает активное размножение микроорганизмов и, соответственно, улучшает очистку сточных вод В настоящее время в России и за рубежом аэротенк-смеситель признан одним из наиболее совершенных сооружений этого типа

Аэротенк-отстойник (рис 3.9 *а*) представляет собой аэротенк с пневматической аэрацией, объединенный со вторичным отстойником в одно сооружение

Зона аэрации аэротенка-отстойника отделена от зоны отстаивания не доходящей до дна перегородкой *3*, угол наклона которой к горизонтали принимается равным 60-70° В нижней части перегородки расположен струенаправляющий козырек шириной не менее 1 м, направленный вниз в зону аэрации под углом 45° к горизонтали

Сточная вода подается рассредоточенно по трубе *1*, расстояние между впусками принимается равным не более двойной ширины зоны аэрации Очищенная сточная вода отводится по сборному лотку *5*, расположенному со стороны отстойника *4* В зоне отстаивания образуется слой взвешенного активного ила, через который фильтруется сточная жидкость Избыточный и активный ил отводятся из зоны взвешенного слоя по трубам, возвратный активный ил под действием силы тяжести возвращается из взвешенного слоя в аэрационную часть сооружения

Общий объем аэротенка-отстойника примерно на 20 % меньше объема обычного аэротенка и вторичного отстойника, не требуется также перекачка возвратного активного ила. Недостатком аэротенка-отстойника является невозможность регенерации активного ила и высокая чувствительность к колебаниям расхода очищаемой сточной воды, отрицательно сказывающиеся на эффективности очистки.

Были проведены сравнительные испытания полупроизводственных аэротенков-смесителей и аэротенков-отстойников при совместной очистке бытовых сточных вод и сточных вод текстильной промышленности После механической очистки сточные воды поступали в аэротенки-смесите-

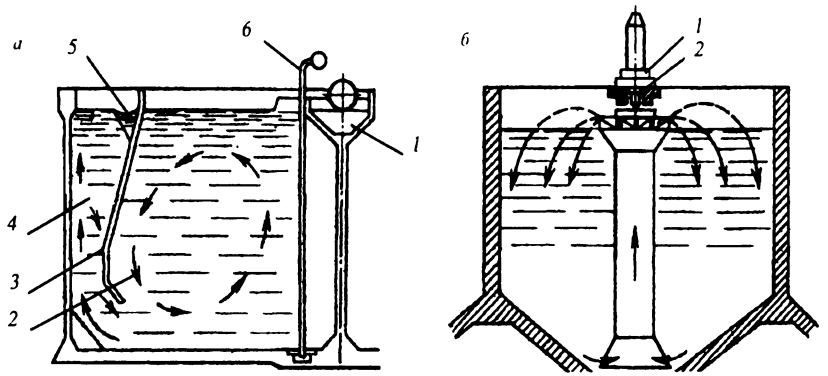


Рис 3 9. Различные системы аэрации

а – аэротенк-отстойник. *1* – труба для подачи исходных сточных вод, *2* – аэротенк, *3* – перегородка, *4* – отстойник, *5* – лоток для сбора очищенной жидкости, *б* – воздуховод, *б* – схема поверхностной аэрации "Симплекс" *1* – вертикальный двигатель, *2* – вращающиеся лопасти

ли или аэротенки-отстойннки На этих аэротенках были получены хорошие малоразличающиеся результаты очистки Однако аэротенк-отстойник оказался более чувствительным к уменьшению содержания растворенного кислорода ниже общепринятой нормы (2 мг/л). Оба аэротенка были устойчивы к залповым сбросам, однако состояние активного ила в них ухудшилось и возрос иловый индекс Быстрее ликвидировались нарушения состояния активного ила в регенераторе аэротенка-смесителя, связанные с залповыми сбросами.

Испытания показали, что при нормальных условиях азротенки-смесители и аэротенки-отстойники работают без существенных различий

Представляет определенный интерес а*эротенк-осветлитель*. Его принцип действия основан на создании в зонах осветления стабильного и постоянно обновляющегося взвешенного слоя активного ила Условия контактирования загрязнений с илом и кислородный режим в таком аэротенке обеспечивают протекание процесса биохимического окисления при относительно высоких нагрузках на ил за счет большой концентрации ила. При этом в процессе биохимического окисления участвует одновременно вся масса активного ила, находящегося в сооружении

Гидродинамическая схема сооружения обеспечивает процессы смешения сточных вод, активного ила и воздуха в зоне аэрации, окисление загрязнений во взвешенном слое активного ила и возврат части активного ила из взвешенного слоя в зону аэрации. Взвешенный слой постоянно перемешивается и снабжается ило-водяной смесью, насыщенной растворенным кислородом Очищаемая вода фильтруется через взвешенный слой активного ила, чем обеспечивается эффективное улавливание загрязнений Удельный расход воздуха составляет 30 м^3 на 1 кг снижения БПК$_5$ (пятисуточная потребность воды в кислороде), объемная нагрузка– 6 кг БПК$_5$ в сутки на один м^3 объема сооружения

Во Франции, США, Канаде и других странах используются *аэротенки полного смешения.* Под таким названием известны аэротенки-смесители, в которых аэрация осуществляется механическим перемешивающим устройством при помощи аэраторов типа «Симплекс», дисковых и других, обеспечивающих интенсивное перемешивание жидкости во всем объеме аэротенка Применяются они главным образом для очистки концентрированных сточных вод с БПК от 1,5 г/л и выше На работу таких аэротенков не влияют значительные колебания состава сточных вод и содержание токсичных веществ

Система поверхностной аэрации «Симплекс» (рис 3 9 *б*) состоит из широкой вертикально расположенной в аэротенке трубы, в верхней части которой, горизонтально размещено мощное разбрызгивающее устройство – вращающийся конус с лопастями. Это устройство разбрызгивает сточную воду и активный ил по поверхности воды и такое же количество воды и ила всасывает со дна аэротенка Система аэрации «Симплекс» надежна в эксплуатации, она широко используется в Великобритании

В настоящее время за рубежом вместо воздуха при пневматической аэрации аэротенков широко применяется кислород Это позволяет интенсифицировать процесс биохимической очистки, повысив использование кислорода до 90 %, хотя обычно оно составляет менее 8-9 %

Турбинные аэраторы, предложенные за рубежом, позволяют в 3-4 раза увеличить количество используемого кислорода по сравнению с пористыми плитами и трубами

Аэрация кислородом успешно применяется при очистке бытовых сточных вод, а также сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности, искусственных смесей органических веществ и др. Этот способ аэрации требует дополнительных капиталовложений Однако в некоторых производствах, например в азотной промышленности, кислород образуется как побочный продукт, не используемый в производственных целях В этом случае аэрация сточных вод кислородом становится рентабельной При пневматической аэрации кислород должен подаваться в герметически закрытый аэротенк, иначе он быстро смешивается с воздухом и концентрация его в аэрируемой смеси понижается.

Применение кислорода вызывает значительное (с 3 до 6 г/л) увеличение количества активного ила в аэротенке. Интенсификация очистки при применении кислорода обусловлена в значительной мере высоким качеством активного ила. Аэрация кислородом не требует интенсивного движения очищаемой жидкости, поэтому образующийся ил состоит из крупных плотных хлопьев, легко флоккулирует, быстро оседает. При этом улучшается состав бактериальных популяций, так как подавляется рост облигатных (обязательных) и факультативных (необязательных) анаэробов, а это, в свою очередь, ускоряет обработку факультативных анаэробов Кроме того, при большой концентрации кислорода не развиваются нитчатые формы бактерий, что предотвращает образование вспухающего ила

На практике эффективность аэрации воздухом ограничивается низкой

концентрацией кислорода в аэрируемой смеси (1-2 мг/л) Для того чтобы достичь необходимого контакта газа и жидкости, необходимо активное перемешивание сточных вод, но при этом разрушаются хлопья ила и замедляется их осаждение

Исследования показали, что при содержании активного ила 10 г/л биохимическое окисление загрязнений ускорялось в 1,3-2 раза, а эксплуатационные расходы не увеличивались Оказалось также, что при использовании кислорода вместо воздуха эксплуатационные расходы снижались на 40-50 %, а общие инвестиции – на 15-20 % Экономия достигается в результате уменьшения размеров очистных сооружений за счет повышения их производительности, а также за счет снижения количества подаваемого газа по сравнению с подачей воздуха При сокращении продолжительности аэрации с 6 до 2 ч уменьшается расход кислорода и электроэнергии

Для эффективного применения кислорода была разработана новая конструкция аэротенка - *окситенк.* Он был опробован в полупроизводственных условиях на сточных водах Щекинского химического комбината Окситенк герметичен, он представляет собой резервуар, снабженный аэратором и совмещенный с илоотделителем. Активный ил в аэрационной колонне насыщается кислородом и перемешивается мешалкой Кислород или воздух поднимается снизу вверх, а сточная вода подается сверху и сбоку. Очищенная вода поступает в отстойник. Окислительная мощность окситенка достигает 5-10 кг БПК на 1 $м^3$ в сутки, что в 3-4 раза превосходит мощности имеющихся на комбинате обычных аэротенков.

Сравнительно недавно стали использовать *аэротенки с противоточным движением жидкости и кислорода* (противоток). По мнению многих исследователей, аэрацию кислородом или воздухом, обогащенным кислородом, целесообразно применять только в противоточном аэротенке Принцип его действия состоит в том, что очищаемая жидкость, подаваемая как в аэротенке-смесителе, движется сверху вниз, а ей навстречу снизу вверх поступает кислород Это обеспечивает тщательное перемешивание кислорода и сточной жидкости и, в итоге, равномерное разрушение загрязнений. Установлено, что при противотоке время контакта сточной жидкости и кислорода составляет 40 с,тогда как при прямотоке – всего 8 с, т.е. длительность контакта при противотоке в 5 раз больше.

Биофильтры. Кроме аэротенков применяют очистные сооружения с фиксированной биомассой. В таких системах сточные воды контактируют с биомассой, закрепленной на поверхности носителя Если сточная вода распределяется методом орошения по загрузке из дробленой породы, то такую установку обычно называют *биофильтром.* К сожалению, это название неправомерно, поскольку протекающий здесь процесс представляет собой биологическое экстрагирование, а не фильтрование С появлением синтетических сред, заменивших дробленый камень, был введен термин *«биологическая башня»*, так как такого рода установки часто достигают высоты 6 м (высота традиционных фильтров с щебеночной загрузкой составляет только 1,8 м) Система с фиксированной биомассой другого типа представляет собой *биологический диск,* где несколько круглых пластин, расположенных на общем валу, медленно вращаются, будучи частично погруженными в бассейн со сточной водой Находящиеся на дисках

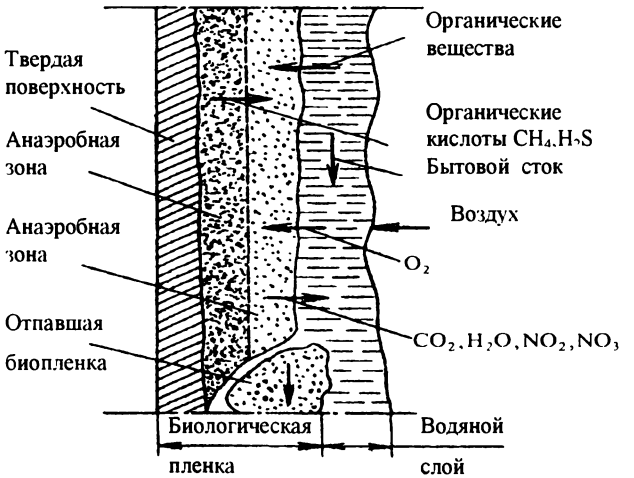


Рис 3 10 Механизм кинетики массопередачи в биореакторах с фиксированной биомассой

микроорганизмы извлекают содержащиеся в сточных водах органические вещества Системы с фиксированными биомассами отличаются друг от друга только конструкцией, в них протекает один и тот же биологический процесс

При орошении фиксированных сред бытовыми сточными водами на поверхности сред образуется биологическая пленка (биопленка) Она состоит главным образом из бактерий, простейших и грибов, питающихся содержащимися в сточных водах органическими веществами Схема протекания биологического процесса приведена на рис 3 10 По мере того как сточная вода проходит по поверхности биопленки, состоящей из микроорганизмов, утилизирующих органические и минеральные компоненты сточных вод в присутствии кислорода происходит биоутилизация с образованием углекислого газа

Количество кислорода, растворенного в жидкости, пополняется за счет абсорбции кислорода из воздуха, находящегося в полостях загрузки фильтра Биологический слой, хотя и очень тонкий, является анаэробным в своей внутренний части. Поэтому хотя биологическое фильтрование и называют аэробным процессом, оно по существу представляет собой факультативный (т е необязательный) процесс, объединяющий деятельность как аэробных, так и анаэробных микроорганизмов

Микроорганизмы в верхних слоях загрузки быстро размножаются, питаясь поступающей в избытке пищей По мере того как сточная вода стекает вниз, содержание органических веществ уменьшается до такой степени, что микроорганизмы в нижней зоне находятся в состоянии голодания Избыток биомассы, вымываемой из фильтра, извлекается из воды во вторичном отстойнике Продувка загрузки необходима, чтобы сохранить поры для прохождения сточной воды и воздуха. Перегрузка фильтра по органическим загрязнениям в сочетании с недостаточной гидравлической нагрузкой может привести к засорению пор в биопленке и, в итоге, к снижению эффективности очистки

Загрузочные материалы для биофильтров. Биологический фильтр (биофильтр) состоит из корпуса, загрузочного материала, а также из водораспределительного, дренажного и воздухораспределительного устройств Сточная жидкость обтекает поверхность загрузочного материала, покрытого биологической пленкой (биопленкой), которую образуют колонии аэробных микроорганизмов Проходя через загрузочный материал, загрязненная вода оставляет на нем примеси, не осевшие в первичных отстойниках, а также коллоидные и растворенные органические вещества. Последние сорбируются биопленкой, покрывающей поверхность загрузочного материала Микроорганизмы, образующие биопленку, используют органические вещества как источник питания и энергии. Таким образом, из сточной воды удаляются органические вещества и в то же время увеличивается масса активной биопленки и тела биофильтра Омертвевшая и отработавшая биопленка смывается протекающей сточной водой и выносится из тела биофильтра.

Принципы классификации существующих видов биофильтров могут быть различными: по степени очистки, по способу подачи воздуха, по режиму работы (наличие или отсутствие рециркуляции), по технологической схеме (одно-, двух- или трехступенчатые) и т.д.

Первые исследования по очистке сточных вод в биофильтрах, загруженных *керамическими кольцами Рашига* размером 1,9-5,6 см, показали, что они могут выдерживать повышенные нагрузки по органическим загрязнениям. В начале 1940-х гг. в качестве загрузки биофильтров впервые были использованы пластмассы. Широкое их применение началось лишь в конце 1950-х гг В настоящее время в США, Канаде, Великобритании и в ряде других стран построены и эксплуатируются десятки станций биофильтрации, где в качестве загрузки биофильтров используют синтетические материалы (рис 3 11) .

Полупроизводственные испытания по очистке сточных вод коксогазовых заводов, содержащих фенолы и цианиды, проводили на установке из двух биофильтров размером 0,9×0,9 м и высотой 4,5 м с *ячеистой загрузкой типа «Полигрид»*, изготовленной путем инжекционного прессования из ударопрочного полистирола или полиэтилена При суточной нагрузке по фенолам 0,4 кг/м^3 и по цианидам 0,3 кг/м^3 в очищенных водах их следов обнаружено не было, отсутствовало и заиливание биофильтров

Были исследованы также биофильтры диаметром 21,3 м с *загрузкой из ячеистых керамических труб* диаметром 71,5 мм и длиной 30,5 см, разде-

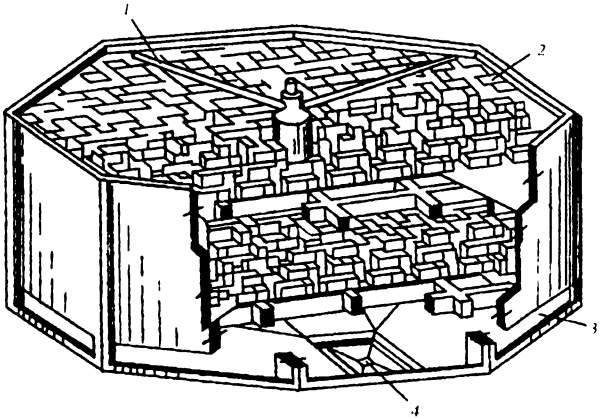


Рис 3 11 Биофильтры с блочной пластмассовой загрузкой
1 – реактивный ороситель, *2* – пластмассовые блоки, *3* – вентиляционные окна *4* – приямок для выпуска сточных вод

ленных продольными перегородками на четыре части и установленных вертикально на решетку со щелями размером 50×100 мм; удельная поверхность такой загрузки 74 $м^2/м^3$ Очистке подвергались бытовые и производственные сточные воды консервных заводов с начальными БПК соответственно 154 и 816 мг/л При производительности 48,5 $м^3/(м^2 \cdot сут)$ достигалось снижение БПК на 55-60 %.

Для очистки бытовых сточных вод, содержащих фенол, использовалась загрузка *типа «Доупак»,* представляющая собой блоки размером 0,95×0,52×0,36 м, выполненные из гофрированных в двух направлениях пластмассовых листов Сравнение работы биофильтров с загрузками из пластмассы и из доменного шлака показало, что снижение концентрации фенола составляет соответственно 82 и 62 %. Высокая пропускная способность при применении двухступенчатого фильтра «Доупак» была достигнута при очистке сточных вод газовых заводов, содержащих фенол (до 50 г/л) и значительные количества крезолов, ксиленолов, пирокатехина и т д При входной нагрузке по БПК, равной 8-9 $кг/(м^3 \cdot сут)$, БПК очищенных вод составляла в среднем 40 мг/л

Была исследована работа биофильтра, построенного для очистки сточных вод сульфатцеллюлозного завода Биофильтр имел в плане восьмигранную форму, его полезный объем составлял 2830 $м^3$ *Загрузка* с высотой слоя 9 м состояла *из чередующихся гофрированных плоских листов поливинилхлорида,* собранных в пакеты размером 0,6×0,6×0,12 м Плотность загрузки составляла 60 $кг/м^3$, удельная поверхность – 130 $м^2/м^3$, пористость – 95 % При эксплуатации сточных вод нагрузка достигала 242 $м^3/(м^2 \cdot сут)$, а нагрузка по БПК – 10,3 $кг/(м^3 \cdot сут)$, эффект снижения БПК превышал 50 % (при начальной величине 420 мг/л)

Исследования по очистке бытовых сточных вод на биофильтре (полупроизводственная установка) *с загрузкой из поливинилхлорида* проводились на кафедре канализации Ленинградского инженерно-строительного института (ЛИСИ). Установка была выполнена из асбестоцементной трубы диаметром 0,28 м, а высота слоя загрузочного материала – 3,4 м Эксперименты показали, что пропускная способность биофильтра с такой загрузкой на 35 % выше, чем у высоконагружаемого биофильтра с гравийной загрузкой

Эти исследования послужили основой для создания *биофильтра-стабилизатора*, предназначенного для полной и неполной биохимической очистки как бытовых, так и производственных сточных вод В биофильтре-стабилизаторе происходит окисление органических загрязнений, находящихся во взвешенном, коллоидном и растворенном состоянии, а также минерализация прирастающей биологической массы (стабилизация) При применении биофильтров-стабилизаторов отпадает необходимость в первичном отстаивании сточных вод и в сооружениях для обработки осадка, т е достигается значительная экономия и упрощается схема очистки

Исследования по очистке городских сточных вод на биофильтре с *загрузкой из гофрированного полиэтилена* проводились в Бакинском филиале ВНИИводгео (Азербайджан) На полупроизводственной установке диаметром 0,25 м с высотой слоя загрузки 4 м, при нагрузке по $БПК_{полн}$ равной 1,6 кг/($м^3$·сут) окислительная мощность по снятой $БПК_{полн}$ составила 1,4 кг/($м^3$·сут).

Для охлаждения сточных вод с температурой 48°С на одной из бумажно-картонных фабрик (США) перед аэротенком были установлены два опытных биофильтра с *загрузкой типов «Полигрид»* и *«Доупак»* с высотой слоя соответственно 3,2 и 6,6 м Предполагалось, что одновременно с охлаждением будет происходить предварительная очистка сточных вод биопленкой, образовавшейся на насадке. Исследования показали, что при начальной БПК 140-400 мг/л и нагрузке сточных вод 87-336 $м^3$/($м^2$·сут) снижение БПК составляло 11-34 % и было практически одинаковым для загрузки обоих типов

Были проведены испытания биофильтра, в котором имелись две ступени *с пластмассовой загрузкой* (С В Яковлев) На первой ступени происходила предварительная очистка сточных вод, при которой БПК снижалась до 50-200 мг/л при нагрузках по БПК 0,6-3 кг/($м^3$·сут), при этом устранялась основная часть загрязнений. Применение первичных отстойников перед первой ступенью считалось необязательным На второй ступени сточные воды очищались до степени, отвечающей санитарным требованиям по БПК (не более 20 мг/л) и по концентрации взвешенных веществ (не более 30 мг/л). Пластмассовую загрузку рекомендуется применять для очистки сточных вод консервных, пивоваренных, дрожжевых, спиртовых, молочных, фармацевтических и целлюлозных заводов, а также текстильных фабрик.

При БПК в неочищенных сточных водах от 300 до 5000 мг/л применение *загрузки типа «Флокор»* позволило снизить эксплуатационные расходы на 26-46 % по сравнению с использованием гравийной загрузки При

очистке сточных вод завода паточного спирта снижение БПК достигло 55-95 % при начальной нагрузке по БПК 0,2-6 кг/($м^3$·сут) В трехступенчатых биофильтрах с загрузкой типа «Флокор» снижение БПК составляло 92 % при начальной БПК около 5000 мг/л

Для очистки сточных вод фармацевтического завода был дополнительно установлен биофильтр с *загрузкой из сарана,* представляющий собой *гофрированные в двух направлениях листы* размером 550×975 мм, установленные вертикально Свободное пространство между листами составляло 25 мм, удельная поверхность загрузки – 89 $м^2/м^3$. Неочищенные сточные воды при начальной БПК = 428 мг/л после первичного отстойника поступали на биофильтр, где БПК снижалась в среднем на 56 % Далее сточные воды направлялись в промежуточный отстойник, рассчитанный на пребывание в нем в течение 15 мин, а затем последовательно в ранее установленные биофильтры, отстойники, песчаные фильтры и контактные резервуары Общее снижение БПК на этих сооружениях, имеющих в своем составе три ступени биофильтров, составляло 99 %.

Биофильтры *системы «Ингрем»* загружали несколькими (пятьюшестью) расположенными один над другим слоями *блоков из поливинилхлорида,* которые разделялись воздушными прослойками, загрузка в сечении имела вид пчелиных сот Сточные воды подавали насосом и разбрызгивали над первыми (сверху) тремя слоями загрузки. Воздух подавали воздуходувкой снизу в каждый слой загрузки. Установка для очистки сточных вод состояла из нейтрализаторов, резервуара для разбавления и смешения, первичных биофильтров с рециркуляцией, вторичных отстойников и вторичных биофильтров. Сточные воды этого завода содержали жирные кислоты, глицерин, жиры, масла, синтетические детергенты, крезол, фенолы и другие примеси. Поступающие сточные воды имели pH 1,5 и $БПК_5$ = 5000-19000 мг/л , а очищенные – $БПК_5$ = 50 мг/л и pH 7

Биофильтры системы «Ингрем» применяют также для очистки сточных вод заводов целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, молочного и текстильного производства, птицеферм и других предприятий При нагрузках по $БПК_5$ = 2-7,5 кг/($м^3$·сут) снижение БПК составляет соответственно 90 и 70 %

Применение биофильтров с пластмассовой загрузкой для очистки бытовых сточных вод экономически более целесообразно, чем биофильтров, загруженных гравием. Были запроектированы две установки для очистки бытовых сточных вод с расходом 38 тыс $м^3$/сут (начальная БПК 200 мг/л) Одна установка имела двухступенчатые биофильтры (по две в каждой ступени) диаметром 39,6 м и высотой 1,8 м с гравийной загрузкой, вторая – двухступенчатые биофильтры диаметром 11,4 м и высотой 3,2 м с гофрированной синтетической *загрузкой типа «Сэфпак».* БПК очищенных сточных вод составила 30 мг/л. Стоимость установки, имевшей в своем составе биофильтры с пластмассовой загрузкой, оказалась на 21 % меньше стоимости установки с гравийными биофильтрами; затраты на их эксплуатацию были примерно одинаковыми

Допускается подавать сточные воды на биофильтры с пластмассовой загрузкой, не подвергая их первичному отстаиванию, поскольку поры биофильтров практически не заиливаются Было отмечено, что даже при

залповом поступлении токсичных примесей биопленка быстро восстанавливает свою работоспособность

Опыт повторного использования сточных вод, прошедших очистку на биофильтрах (в качестве которых использовались градирни), показал, что очищенные сточные воды можно использовать в качестве подпиточной воды в оборотной системе водоснабжения. Система успешно работала в течение 11 лет: снижение концентрации фенолов достигало 99,9 %, нефти – 84 %, ХПК и БПК – более 90%.

На опытной установке с загрузкой типа «Сэфпак» были проведены также испытания по очистке сточных вод химического завода. Биофильтры с синтетической загрузкой снижали БПК сточных вод на 70 %, концентрацию взвешенных веществ – на 80 % и нормально работали при температуре сточных вод 45-50°С.

В качестве жестких засыпных загрузочных материалов для биофильтров могут использоваться различные пластмассовые, керамические и металлические изделия (со значительной удельной поверхностью, высокой степенью пористости и малой плотностью), которые применяются в массообменных колоннах и аппаратах.

Биодиски *(погружные биофильтры)*. В течение нескольких лет дискутировался вопрос: к какому типу сооружений относить диски – к аэротенкам или биофильтрам. Спор решился в пользу биофильтров. Их называют также просто биодисками или вращающимися контакторами.

Биодиски имеют ряд преимуществ, поэтому к ним проявляется большой интерес, непрерывно ведутся работы по их совершенствованию. Первоначально биодиски применяли для очистки небольших количеств сточных вод, а впоследствии – и для очистки больших количеств (до 100 тысяч $м^3$/сут).

Первые диски изготавливали с гладкой поверхностью В последние годы предпочтение отдается профильной поверхности, что позволяет увеличить удельную поверхность дисков. На поверхности дисков образуется биологическая пленка, образованная микроорганизмами, которые получают необходимое для своего развития количество питательного субстрата и кислорода во время периодических задержек биодисков в очищаемой воде и в воздухе В результате движения дисков достигается размешивание среды, которое облегчает процесс утилизации загрязнений Были разработаны диски, вращающиеся за счет подачи воздуха, благодаря чему улучшается аэрация среды.

Диски изготавливают из легкого искусственного материала (прежде всего из пластмассы). Диаметр дисков обычно составляет 2,0-4,0 м, частота вращения 0,5-3,0 $мин^{-1}$ при периферийной скорости 0,3-0,4 м/с. Диски размещают в прямоугольных бассейнах, которые, в зависимости от их объема, изготавливают из железобетона или бетона. Обычно рекомендуется предусматривать для биодисков легкую крышу, которая предотвращает попадание на них прямых солнечных лучей или влияние других атмосферных явлений, позволяет сохранить жизненные функции микроорганизмов

К техническим характеристикам биодисков относятся их размеры, число, конструкция и рельеф поверхности, глубина погружения, частота вра-

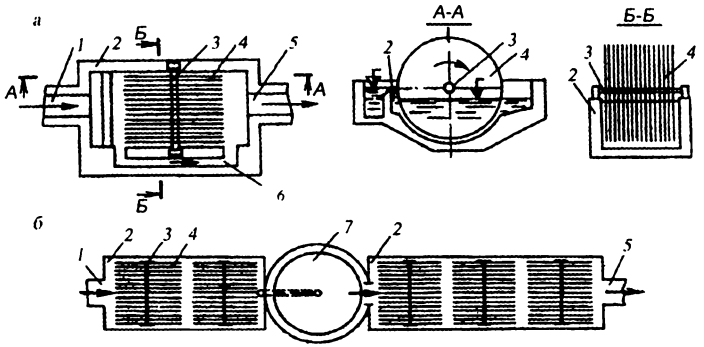


Рис 3 12 Погружные биофильтры

а – одноступенчатый, *б* – пятиступенчатый с промежуточным отстойником, *1* – подводящий лоток, *2* – резервуар, *3* – вал, *4* – диски, *5* – отводящий лоток, *6* – перепускной канал, *7* – отстойник

щения и др. На скорость очистки оказывают влияние также начальная концентрация загрязнителя, содержание растворенного кислорода, толщина биопленки, температура, pH среды и другие факторы.

Еще в 1917 г. в России была выдана «Привилегия на способ биологического очищения воды, отличающийся тем, что в бассейне с очищаемой водой повторно погружаются и поднимаются для предоставления действию воздуха железный каркас с натянутыми в нем проволоками, на которые насажены пластины из пробки, ваты или кусков ткани, или тела из легкого материала». Этот принцип работы биофильтров нашел техническое применение лишь в 1960-х гг. Такие конструкции биофильтров получили название погружных (рис. 3.12).

В Германии для погружных биофильтров были использованы диски диаметром от 0,65 до 3 м; при диаметре диска 3 м оптимальная частота вращения составляла 2-3 мин$^{-1}$ Большую роль играла степень погружения дисков наибольший эффект достигался, когда их опускали в жидкость на 0,45 диаметра, т.е оси валов находились несколько выше уровня сточных вод. При вращении валов развивающиеся на пластмассовых дисках микроорганизмы попеременно приходили в контакт с воздухом и со сточными водами, благодаря чему создавались хорошие условия для жизнедеятельности биопленки. Предложена также конструкция агрегата, смонтированного на автоприцепе, что позволяет доставлять установку в любое место, быстро ее монтировать и демонтировать.

Погружные биофильтры были также опробованы для очистки производственных и бытовых сточных вод в Штутгарте и Цюрихе; пакеты пластмассовых дисков (по 30-180 дисков в каждом пакете) закреплялись на валу на расстоянии 15 мм друг от друга. Диски до половины погружались в лоток, через который пропускали сточные воды; частота вращения дисков составляла 1,5 мин$^{-1}$. Такие биофильтры малочувствительны к колебаниям расхода и концентрации сточных вод, что позволяло обеспечить любую степень очистки. Кратковременные залповые поступления сточных вод лишь незначительно ухудшали качество очистки

По сравнению с аэротенками погружные биофильтры менее чувствительны к токсичным веществам, минеральным маслам и синтетическим детергентам Пропускная способность этих биофильтров снижалась только при длительных перегрузках сооружений.

Результаты отечественных и зарубежных исследований и опыт эксплуатации позволяют сделать выводы, что погружные биофильтры могут быть рекомендованы для очистки бытовых и производственных сточных вод с расходом до 500-1000 $м^3$/сут. Биофильтры этого типа просты в эксплуатации, не требуют больших перепадов высот при движении воды (что свойственно всем другим конструкциям биофильтров), а при наличии перепада, равного 0,5 м, пакет дисков может вращаться за счет энергии падающей струи воды. Погружные биофильтры выдерживают залповые поступления сточных вод: их целесообразно применять при неравномерном поступлении сточных вод. Для обеспечения большей надежности в работе следует применять преимущественно двух- или трехступенчатые погружные биофильтры.

Установки с псевдоожиженным слоем. Аэрационные сооружения с загрузкой из различных материалов получили название *биотенков.* Очистка сточных вод в этих сооружениях происходит как в свободном объеме, так и на поверхности загрузочного материала. Загрузка биореакторов с неподвижной насадкой может выполняться в виде отдельных блоков из пластмассовых жестких или гибких материалов. Блоки размещают таким образом, чтобы обеспечить эффективную циркуляцию иловой смеси в зазорах между ними и в придонном пространстве для предотвращения выпадения ила на дно сооружения Так как скорости движения иловой смеси относительно невелики, биопленка на поверхности загрузочного материала наращивается сравнительно быстро В результате средняя концентрация биомассы в реакторе превышает общепринятые концентрации активного ила в аэротенках.

Применение взвешенного (псевдоожиженного) слоя для биологической очистки сточных вод значительно меняет традиционную технологию. *Установка с псевоожиженным слоем песчаной загрузки «Окситрон»,* пред-

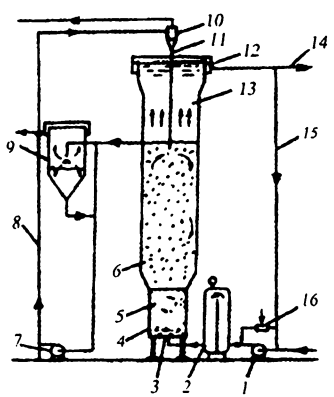


Рис. 3 13. Схема установки с псевдоожиженным слоем песчаной загрузки

1 – подающий насос, *2* – сатуратор, *3* – отражающий конус, *4* – реактор, *5* – чистый песок, *6* – зона взвешенного песка с прикрепленными микроорганизмами, *7* – песковый насос, *8* – пульпопровод, *9* – илоуплотнитель, *10* – напорный гидроциклон, *11* – насадка, *12* – водосливной лоток, *13* – зона осветления, *14* – сброс очищенной воды, *15* – рециркуляционный трубопровод, *16* – эжектор

назначенная для биологической очистки сточных вод с применением технического кислорода, разработана фирмами «Эколотрон» и «Дорр–Оливер» (США)

В установке со взвешенным слоем объединены преимущества аэротенков и биофильтров Технологическая схема включает в себя биореактор, в котором очищаемая сточная жидкость проходит снизу вверх со скоростью 13-63 $м^3$/ч, достаточной для создания взвешенного слоя песчаной загрузки, находящейся в реакторе Как и в биофильтре, популяция микроорганизмов покрывает зерна песчаной загрузки Частицы песка обеспечивают значительную поверхность для роста микроорганизмов активного ила, составляющую 3330 $м^2$ на 1 $м^3$ реактора За один цикл протекания жидкости потребляется 65-70 мг/л растворенного кислорода Процесс стабилен при залповых нагрузках и менее подвержен токсичному влиянию загрязнений сточных вод. Высота слоя взвешенной загрузки составляет до 3 м, размер частиц чистого песка–0,6 мм,а частиц песка с илом –0,8-2 мм Избыток активного ила отводят с границы раздела взвешенной загрузки и осветленной воды Песок отмывают от активного ила на виброситах или, лучше всего, в гидроциклонах и возвращают в реактор для повторного использования. Концентрация биомассы в реакторе может составлять от 12 до 40 г/л, эффективность использования подаваемого технического кислорода – 90 % Процесс не требует разделения иловой смеси, поскольку в выходящей из загрузки жидкости содержится лишь незначительное количество веществ во взвешенном состоянии

Во ВНИИводгео разработана конструкция опытно-промышленной установки с псевдоожиженным слоем песка (УПСП) для очистки азотсодержащих сточных вод (рис.3.13) .

УПСП включает в себя реактор диаметром 0,75 м и высотой 5,5 м, загруженный в нижней части песком (размер частиц 0,3-0,8 мм), систему растворения технического кислорода в поступающей сточной жидкости, узлы распределения, отвода и рециркуляции жидкости, гидроциклон для отмывки песка от активного ила, отстойник-уплотнитель, насосы

3.3. Интенсификация работы очистных сооружений

Повысить интенсивность работы аэротенков можно за счет различных мероприятий повышения концентрации ила в сооружении, выравнивания нагрузки на ил и исключения шоковых перегрузок, создания оптимальных pH и температуры, а также определенной гидродинамической структуры в сооружении, улучшения снабжения кислородом и т п В последнее время для этой цели широко используются химические и биохимические способы: применение активного угля, создание систем с закрепленными ферментами и др

Повышение концентрации активного ила в аэротенках – основной из возможных путей интенсификации их работы. Считается, что с повышением дозы активного ила в зоне аэрации с 1-2 до 25 г/л происходит

пропорциональный рост окислительной мощности аэротенков с 0,5-1 до 12 кг $БПК_{полн}/м^3 \cdot сут$ Однако с повышением концентрации активного ила в аэротенках увеличивается вынос его из вторичных отстойников, что связано с ухудшением гравитационного разделения иловых смесей по мере повышения их концентрации

Нормальная работа аэротенков осуществляется при предельных концентрациях активного ила в иловой смеси, поступающей во вторичные отстойники Эта предельная концентрация для различных очистных сооружений может быть разной и зависит от многих факторов Увеличивая до возможного предела концентрацию активного ила в аэротенках, можно несколько повысить их производительность и улучшить качество очистки сточных вод При этом нужно учитывать, что положительный эффект может быть достигнут только при полном обеспечении биохимического процесса кислородом

Биохимическая очистка с использованием технического кислорода или обогащенного кислородом воздуха. Очистные сооружения, в которых применяется этот метод, в России получили название «окситенки» За рубежом принят более общий термин – «сооружения с использованием чистого кислорода», объединяющий окситенки и биофильтры, а также термин «аэротенки с использованием чистого кислорода»

Реальный путь дальнейшего совершенствования работы биофильтров - исследование процессов, происходящих в биопленке Сейчас проводятся исследования диффузии кислорода в пленку, ее активной толщины (установлен максимум активной толщины – 70 мкм), условий изъятия элементов питания, биохимии процессов и т п Реакторы с прикрепленной биомассой привлекают все большее внимание специалистов и все чаще применяются на практике для очистки сточных вод

Совершенствование конструкции очистных сооружений. Усилия следует направлять на разработку более совершенных массообменных процессов, повышение гидродинамических характеристик, поддержание постоянной и необходимой концентрации микроорганизмов в биореакторе и интенсификацию их жизнедеятельности Чем более совершенна конструкция очистных сооружений, тем лучше необходимые технологические параметры очищенных вод, тем ближе они к необходимым санитарным нормам и требованиям

Проведение процесса ферментации в присутствии плавающей насадки – эффективный путь интенсификации массообменных процессов в колонных биореакторах за счет дополнительной турбулизации среды и выравнивания профиля концентраций по сечению колонны Были выполнены экспериментальные и теоретические исследования работы колонного биореактора с плавающей насадкой, показавшие его высокую эффективность при проведении различных процессов микробиологического синтеза Достигнутая продуктивность в колонном секционированном биореакторе с плавающей насадкой составляет 4,5-5,2 кг/($м^3$ ч) при выращивании дрожжей на *н*-парафинах и 6,2-6,6 кг/($м^3$ ч) при использовании мелассы в качестве субстрата Удельные энергозатраты на 1 кг биомассы составляют соответственно 2,2-2,3 и 1,0-1,1 кВт ч на 1 кг биомассы Промышленный колонный биореактор такого принципа действия объемом

900 м^3 обеспечит получение 50 т биомассы дрожжей из *н*-парафинов в сутки

Новые типы биореакторов, позволяющие интенсифицировать процесс очистки.

– биореакторы с циклическим вводом энергии,
– биореакторы с псевдоожиженным слоем насадки;
– биореакторы с полупроницаемой или пористой перегородкой,
– биопленочные биореакторы и реакторы для иммобилизованных клеток,
– биореакторы с использованием повышенного парциального давления кислорода,
– биореакторы с электромагнитной или электрической обработкой среды,
– биореакторы с устройством для концентрирования и возврата микробных клеток

Фильтры с плавающей загрузкой, выполненные из пенополистирола, шунгезита и других материалов с плотностью меньшей, чем у воды Наиболее целесообразно применять для доочистки сточных вод фильтр с нисходящим фильтрационным потоком типа ФПЗ-4 (рис 3 14)

Движение фильтрационного потока в фильтре происходит в направлении, соотвстствующем снижению крупности неоднородной загрузки с диаметром гранул от 0,3 до 12 мм Плавающая загрузка удерживается на определенной глубине в корпусе фильтра с помощью решетки или перекрытия из сборного или монолитного железобетона с фильтрующими кассетами. Фильтрованная вода отводится через дренаж в нижнем с слое мелкозернистой загрузки, что предотвращает расширение этого слоя и вынос задержанных загрязнений Промывку плавающей загрузки осуществляют исходной нефильтрованной водой, находящейся в надфильтровом пространстве.

Результаты исследований по доочистке биологически очищенных сточных вод на фильтрах типа ФПЗ-4 показывают, что при высоте слоя загрузки 1200 мм, исходной концентрации взвешенных веществ до 60-80 мг/л, скорости фильтрования 8-12 м/ч снижение $БПК_5$ составляет 60-75 %, а концентрации взвешенных веществ – 90-98 % Продолжительность фильтроцикла в зависимости от скорости фильтрования и концентрации взвешенных веществ в исходной воде варьируется от 8 до 72 ч

Для доочистки сточных вод применяют фильтры с зернистой загрузкой из кварцевого песка, антрацита, гранулированного доменного шлака, керамзита, пенополистирола, пенополиуретана и других материалов Перед фильтрами в большинстве случаев устанавливают барабанные сетки с ячейками размером 0,3-0,5 мм, что обеспечивает удаление крупных грубодисперсных примесей и выравнивание концентраций взвешенных веществ в поступающей на фильтры воде

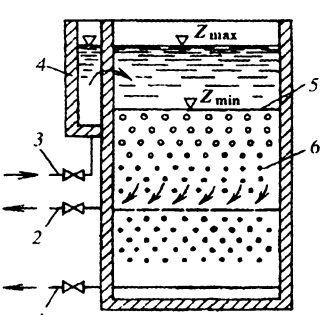


Рис. 3 14. Фильтр с плавающей загрузкой
1 – отвод промывной воды, *2* – отвод фильтрата, *3* – подача очищаемой воды, *4* – канал для очищаемой воды *5* – удерживающая сетка, *6* – плавающая загрузка, Z_{max}, Z_{min} – максимальный, минимальный уровни воды

На зернах загрузки фильтров образуется биологическая пленка, в состав которой входят аэробные микроорганизмы, сохраняющие свою жизнеспособность благодаря кислороду, растворенному в биологически очищенных сточных водах Таким образом, фильтрующая загрузка выполняет роль биологического фильтра, в котором продолжаются процессы биохимического окисления загрязнений Скорость и глубина этого процесса лимитируются концентрацией растворенного в воде кислорода, важно, чтобы его концентрация была возможно большей и обеспечивала создание аэробных условий во всей толще фильтрующей загрузки Насыщение биологически очищенных сточных вод кислородом перед их фильтрованием несомненно будет способствовать резкому снижению их БПК

Для повышения работы биофильтра рекомендуется *увеличение времени контакта сточных вод с загрузкой* и регулирование этого времени Удельный вес материала загрузки составляет менее 1000 кг/м^3 Установка с керамзитовой загрузкой, на которой формируется биопленка, обеспечивает 90%-ю очистку сточных вод по $БПК_5$, этот вид загрузки отличается простотой и высокой надежностью при эксплуатации

Из всех применяемых видов фильтровальных насадок (загрузок) на основе естественных (на минеральной основе) и искусственных материалов следует выделить пластмассовые насадки из поливинилхлорида, полипропилена, полиэтилена и т д , которые имеют высокую удельную поверхность и порозность при небольшой собственной массе

3.4. Анализ конструктивного оформления элементов очистных сооружений и методов их расчета

3.4.1. Аэротенки

Скорость удаления загрязнений при очистке сточных вод в аэротенках, как и скорость любого химико-технологического процесса, зависит от ряда факторов кинетических и гидродинамических закономерностей, молекулярной и турбулентной диффузии, от возможности агрегирования и т д , которые подробно описаны в литературе К сожалению, до настоящего времени практически отсутствуют глубокие исследования по оценке влияния этих явлений на эффективность процесса изъятия органических загрязнений Следствием этого является большое многообразие методов расчета аэротенков и инженерного оформления самих конструкций без видимых преимуществ одной перед другой

Аэротенки, как один из типов биохимических реакторов, в настоящее время подразделяются на три класса в зависимости от организации перемешивания и аэрирования аэротенки-вытеснители, аэротенки-смесители, аэротенки промежуточных типов

В *аэротенках-вытеснителях*, называемых в отечественной практике аэротенками коридорного типа, очистка сточных вод происходит по мере движения потока от точки впуска до его выхода из аэротенка (*1*) В начальных участках (смотри рис 3 15) наблюдается перегрузка активного

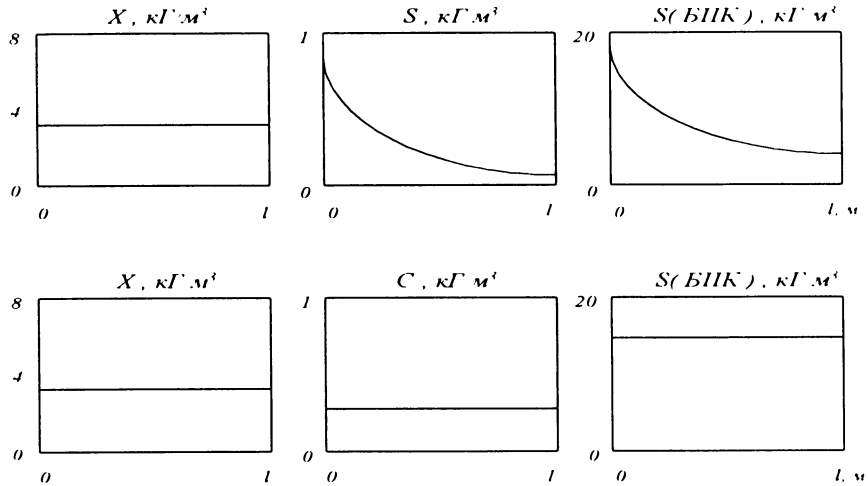


Рис 3 15 Распределение концентрации активного ила (X), кислорода (C) и субстрата (S) по длине (l) аэротенка-вытеснителя

Рис 3 16 Характер распределения концентрации активного ила, кислорода и субстрата по длине аэротенков полного смешения

ила питательными веществами и дефицит кислорода Далее при равномерной аэрации активный ил получает избыточное количество кислорода при недостатке питательного вещества, так что нормальные условия по активности обеспечиваются лишь в некотором промежутке времени пребывания очищаемых сточных вод в аэротенке Другими словами, технологический процесс в коридорных аэротенках не позволяет с достаточной полнотой использовать рабочий объем этих сооружений Вместе с тем, когда в коридорный аэротенк подается сточная вода с высокой концентрацией загрязнений, происходит гибель микроорганизмов на начальных участках за счет перегрузки Несмотря на эти недостатки, многие исследователи отдают предпочтение таким конструкциям аэротенков по сравнению с аэротенками-смесителями При этом утверждается, что производительность коридорных аэротенков гораздо выше, чем у аэротенков-смесителей, и что утилизация кислорода в них идет более рационально

Разработаны аэротенки-смесители, в которых отсутствуют некоторые недостатки коридорных аэротенков, в частности гибель микроорганизмов при залповых сбросах Это достигается тем, что в аэротенки-смесители сточная жидкость подается так же, как и активный ил – рассредоточенно при интенсивном перемешивании, что обеспечивает большое разбавление сточной жидкости очищаемой водой, находящейся в аэротенке Коцентрации поступающих загрязнений могут достигать 2000-3000 мг/л по $БПК_{полн}$ и более Реакция окисления в аэротенках-смесителях протекает почти в гомогенных условиях (псевдогомогенных) Кроме того, обеспечивается постоянство концентрации растворенного кислорода по всему объему сооружения (рис 3 16) В числе основных достоинств аэротенков-смесителей

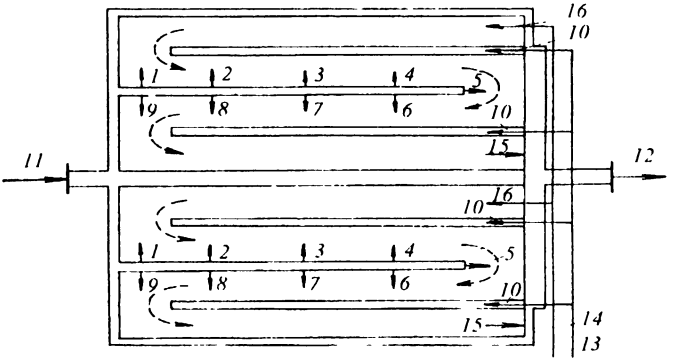


Рис 3 17 Принципиальная схема четырех-коридорного аэротенка

1–9 – номера шиберов для подачи осветленных сточных вод, *10* – фильтросные каналы для подачи воздуха, *11* – подача воды от первичных отстойников, *12* – выпуск воды на вторичные отстойники *13* – подача воздуха, *14* – подача активного ила, *15* – выпуск иловой смеси, *16* – ввод активного ила

следует отметить их надежность в эксплуатации и простоту конструкции К недостаткам относится возможность проскока части жидкости без достаточной очистки, поэтому остаточные величины $БПК_{полн}$ в выходящей из этих сооружений сточной воде несколько больше, чем в сточной воде коридорных аэротенков Разновидностью аэрационных сооружений является аэротенк, схема которого показана на рис 3 17, этот аэротенк можно применять как для больших, так и для малых станций По этой схеме объем регенератора можно изменять в пределах от 25 до 75 % общего объема сооружений В сооружениях данного типа работу аэротенков можно осуществлять по ступенчатой схеме, согласно которой сточные воды подаются в аэротенк рассредоточенно посредством шиберов *1-9*, открытие или закрытие которых зависит от начальных концентраций сточных вод

Хорошие результаты по очистке сточной воды достигаются секционированием обычных аэротенков-вытеснителей на 3-5 последовательно соединенных ячеек полного смешения К этому типу можно отнести аэротенки с переменной гидравлической структурой, устанавливаемой оператором в зависимости от конкретных эксплуатационных условий Их отличие от аэротенков-вытеснителей или аэротенков-смесителей состоит в том, что сточная жидкость подается в зону аэрации попеременно – сосредоточенно или рассредоточенно Подача возвратного ила во всех случаях производится рассредоточенно, а отведение очищенной иловой смеси во вторичный отстойник всегда сосредоточенно

В настоящее время существует большое многообразие конструкции аэротенков, имеющих свои преимущества и недостатки, но ни одна из

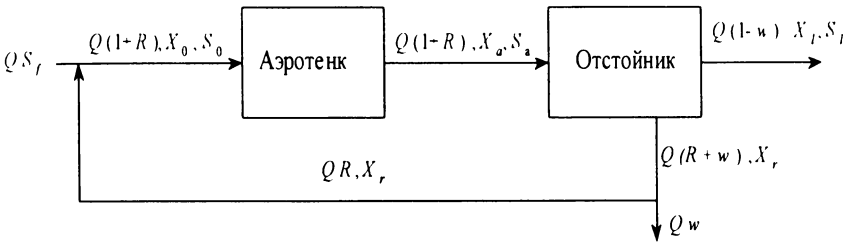


Рис 3 18 Структура потоков в системе аэротенк-отстойник с рециклом

конструкций не может быть признана универсальной Выбирая ту или иную схему организации потоков аэротенка, проектировщики ориентируются, главным образом, на свою профессиональную интуицию

Аэротенки-смесители используются при больших концентрациях загрязнений и большой степени неравномерности поступающих стоков В остальных случаях используются аэротенки-вытеснители и аэротенки промежуточного типа

Был предложен (В Вавилин, В Васильев) метод расчета минимального объема системы аэротенк-отстойник (рис 3 18) с учетом возраста активного ила (θ), который определяют по заданной концентрации возвратного ила X (все обозначения концентраций приведены на структурной схеме рис 3 18)

$$\theta = \frac{T_a X_a + T_0 X_I}{Y(S_0 - S_I)}, \qquad (3\ 1)$$

где T_a, T_0 – время аэрации в аэротенке и время отстаивания в отстойнике, соответственно, X_a, X_I – концентрация ила на выходе аэротенка и отстойника, соответственно, Y – коэффициент трансформации загрязнений в биомассу микроорганизмов, S_0, S_I – концентрация загрязнений на входе и выходе потока системы аэротенк-отстойник, соответственно

Уравнение (3 1) преобразуем к виду

$$[v_0(\theta)]^{3/2}\left[\theta - \frac{k_s + S_I}{\mu_0 S + M(\theta)}\right] = \frac{0{,}1\sqrt{Q}}{\sqrt{\pi(1+R)}}\left[\frac{(R+\omega)X_r}{\alpha X_I}\right]\frac{X_r}{Y(S_0 - S_I)}, \qquad (3\ 2)$$

где k_s – концентрация загрязнений по модели Моно, при которой скорость реакции равна ½ максимальной, v_0 – начальная скорость осаждения под действием сил тяжести при $X - X_\xi$ (от 1 до 10 м/ч), α – константа (≈ 2), X_I, X_r – концентрация ила на выходе отстойника и возвратного ила, соответственно, R – коэффициент рециркуляции, Q – количество стоков, поступающих в систему, ω – коэффициент потока с избыточным активным илом

$$\omega = \frac{(1+R)Y(S_0 - S_I) - X_I}{X_r - X_I} \qquad (3\ 3)$$

Константу μ_0 определяют по формуле

$$\mu = \mu_0 \frac{1/\theta + b_n}{1/\theta + b_n + d} = \mu_0 M(\theta) \qquad (3\ 4)$$

Концентрация активного ила на выходе аэротенка

$$X_a = \frac{X_0 + Y(S_0 - S_l)}{1 + bT_a} \qquad (3\ 5)$$

Здесь T_a – время аэрации в аэротенке полного перемешивания

$$T_a = \frac{Y(k_s + S_l)(S_0 - S_l)}{\mu X_a S_l}, \qquad (3\ 6)$$

b – константа скорости самоокисления ила

$$b = (1/\theta + b_n)\frac{1/\theta + b_v + d}{1/\theta + b_n + d} + 1/\theta \qquad (3\ 7)$$

При выводе соотношений (3.4) и (3.7) полагают, что ил состоит из активной и мертвой частей, причем b_n , b_v – константы скорости окисления мертвой и активной частей ила, соответственно, d – константа скорости отмирания ила

Время отстаивания в отстойнике

$$T_0 = \frac{H(R + \varpi)}{(1+R)(\alpha - 1)} \frac{1}{v_0} \left(\frac{(\alpha - 1)}{\alpha} \frac{X_r}{X_\varsigma} \right)^\alpha, \qquad (3\ 8)$$

где X_ς – некоторая постоянная концентрация активного ила, H - высота аэротенка

Численно решив уравнение (3 1) для фиксированного значения X_r, по уравнениям (3 5), (3 6) и (3 8) определяем X_a, T_a, T_0

Недостатком этого метода является то, что соотношения (3 1) - (3 5) получены для аэротенков-смесителей, тогда как в реальных условиях структура потока в аэротенках находится в промежуточном состоянии между идеальным смешением и вытеснением

Формулы для расчёта высокопроизводительных аэротенков, предложенные Я Карелиным с соавторами, учитывают начальные и конечные концентрации сточных вод, поступающих на очистку, и дозу активного ила в системе

Время аэрации в высокопроизводительном аэротенке (T_a) определяют по формуле

$$T_a = (S_0 - S_l)/(16 + 0{,}75A^{0{,}75}S_l^{0{,}75}) \qquad (3\ 9)$$

Время отстаивания

$$T_0 = 0{,}45AI^{0{,}55}/B^{1{,}12} + 1{,}25. \qquad (3\ 10)$$

где A – рабочая доза активного ила в смеси по беззольному веществу, г/л, T_0 – время отстаивания в отстойнике, ч; I – иловый индекс, см^3/г, B – вынос взвешенных веществ в мг/л

Аналогичная методика расчёта предложена в СниП 11-32-74, согласно которой продолжительность аэрации аэротенков всех типов определяется по формуле

$$t = \frac{S_0 - S_l}{AR_{cp}}, \qquad (3\ 11)$$

где R_{cp} – средняя скорость окисления загрязнений

При сравнении результатов расчёта, выполненных по формулам (3 9) и (3 10), были обнаружены большие расхождения Так, при дозе активного ила 2 г/л и зольности 0,25 сточные воды с концентрацией по БПК, равной 250 мг/л, в первом случае необходимо аэрировать 4,1 ч, чтобы получить S_l = 15 мг/л по БПК, а во втором случае – 7,5 ч Если же требуется довести уровень очистки до S_l = 30 мг/л, то по формуле (3.9) необходимо аэрировать 2 ч, а по формуле (3.11) – 4,9 ч

Перечисленные методы не учитывают кинетику изъятия органических веществ из сточных вод и их потребление микроорганизмами

В современной практике скорость процесса изъятия органических загрязнений микроорганизмами выражают в виде кинетических уравнений, получаемых из формальной схемы, принятой тем или иным исследователем на основе наблюдений

В кинетике биохимических процессов применяются математические описания, в основу которых положены классические представления о ферментативных реакциях В настоящее время существует большое многообразие математических соотношений, описывающих основные кинетические процессы роста микроорганизмов

Среди моделей, учитывающих кинетику изъятия субстрата, широкое распространение получили модели В Эккенфельдера, Р Маккини и др Для того чтобы отдать предпочтение какой-либо из них, необходим сравнительный анализ этих моделей

Из всего сказанного можно сделать следующий вывод В настоящее время существуют многочисленные приближенные методы расчета аппаратов, входящих в схему биохимической очистки сточных вод Эти методы, основанные на эмпирических или полуэмпирических зависимостях, не всегда учитывают гидродинамические особенности и кинетические закономерности происходящих в аппаратах процессов, так что часто расчетные объемы сооружений оказываются неоправданно завышенными или заниженными В общем случае проектирование оптимальных технологических схем биохимической очистки представляется возможным лишь

при создании моделирующих систем, включающих в себя модули расчета отдельных аппаратов и учета возможных связей между ними (организация байпасных и рециркуляционных потоков)

3.4.2. Отстойники

Отстаивание – один из основных этапов выделения из сточных вод нерастворимых (оседающих или всплывающих) механических примесей – взвешенных веществ, эмульгированных масел и т п Наиболее простыми и «старыми» из сооружений, работающих по принципу отстаивания, являются песколовки

В настоящее время в практике водоочистки используют отстойники периодического и непрерывного действия Отстойники непрерывного действия в зависимости от направления течения жидкости подразделяются на горизонтальные, вертикальные и радиальные

Горизонтальный отстойник (рис 3 19) представляет собой прямоугольный бассейн, оборудованный водораспределительным и водосборным устройствами, трубопроводами для подвода осветляемой воды, а также устройством для периодического удаления, выпавшего осадка Их применяют на водоочистных станциях хозяйственно-питьевых и промышленных водопроводах, производительность которых составляет более 30000- 50000 м^3/сутки при удалении из воды коагулированной взвеси Существенным недостатком горизонтальных отстойников является трудность, связанная с механизацией процесса удаления из них осадков

Расчет горизонтального отстойника заключается в определении его геометрических размеров (длины и ширины) и требуемой степени осветления жидкости

$$\frac{H_0}{L} = \frac{u_0 - w}{v_c}, \qquad (3\ 12)$$

где H_0 – глубина отстойника, L – длина отстойника; u_0 – расчетная скорость осаждения взвеси в статических условиях, мм/с, w – среднее значение вертикальной составляющей скорости потока мм/с, v_c - средняя горизонтальная скорость движения воды в отстойнике, мм/с

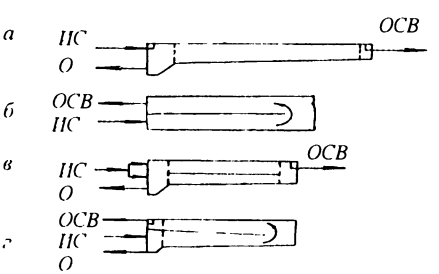


Рис 3 19 Схемы движения воды в горизонтальных отстойниках разного типа

а) одноэтажный прямоточный (разрез), *б*) одноэтажный с поворотом потока, (план), *в*) двухэтажный прямоточный (разрез), *г*) двухэтажный с поворотом потока (разрез), *О* - осадок, *ИС* - иловая смесь *ОСВ* - очищенные сточные воды

Формулу (3.12) можно представить в виде

$$L = \alpha \frac{v_c}{u_0} H_0, \qquad (3\ 13)$$

где α – коэффициент, учитывающий влияние вертикальной составляющей скорости потока, равный

$$\alpha = \frac{u_0}{u_0 - v_c / 30},$$

$$v_c = k u_0$$

Коэффициент k находят в зависимости от соотношения L/H_0

k	7,5	10	12	13,5
L/H_0	10	15	20	25

Ширину отстойника В определяют по формуле

$$B = Q / v_c H_0,$$

где Q – расход воды, м^3/с

Значения u_0, w, v_c определяют экспериментально или с помощью кривой осаждения Разработан статистический метод расчёта, учитывающий влияние вертикальной составляющей скорости на осаждение частиц взвеси разной гидравлической крупности (Г Павлов)

Вертикальный отстойник представляет собой круглый или квадратный в плане резервуар, оборудованный трубопроводом для подачи осветляемой воды, камерой хлопьеобразования, желобами для сбора осветленной воды, а также трубопроводом для периодического выпуска осадка или опорожнения отстойника Преимуществом вертикальных отстойников является простота удаления из них осадков, которое производится под гидростатическим давлением Их конструкция позволяет удалять осадок без специальных устройств Такие отстойники применяются для осаждения скоагулированной взвеси с производительностью до 20000 м^3/сутки Однако, несмотря на это преимущество, вертикальные отстойники получили распространение главным образом для осветления бытовых сточных вод, а для промышленных предприятий их применяют сравнительно редко Объясняется это тем, что при одинаковой нагрузке сточной жидкости рабочий эффект вертикальных отстойников, как правило, ниже, чем горизонтальных, а также тем, что пропускная способность одного вертикального отстойника сравнительно мала При значительном количестве производственных сточных вод это приводит к необходимости строить большое количество отстойников, что осложняет их эксплуатацию

Исследования работы вертикальных отстойников показали, что наиболее благоприятные условия отстаивания в них создаются в тех случаях, когда расчетная скорость движения воды равна 0,2-0,3 мм/с

Гидравлический расчет вертикальных отстойников (рис 3 20) ведется двумя методами. По *первому методу* исходными расчетными величинами являются расчетная скорость протока сточной жидкости в отстойнике $v_р$ и расчетная продолжительность отстаивания t. Величина $v_р$ принимается с учетом наименьшей скорости осаждения u_0 частиц взвешенных веществ, на задержание которых рассчитывается отстойник ($v_р \approx 0,5 - 0,7\, u_0$)

Величина u_0 принимается в соответствии с требуемым эффектом задержания взвешенных веществ и данными о кинетике их осаждения

Продолжительность отстаивания t принимается на основании опытных данных по отстаиванию данной или аналогичной сточной жидкости

Диаметр центральной трубы d зависит от принятой скорости движения воды в ней ($v_т$)

Величина $v_т$ оказывает значительное влияние на работу отстойника, поэтому ее следует принимать с учетом общей глубины отстойника и глубины погружения центральной трубы, а также наличия ниже трубы отражательного щита При глубине ($H \geq 3$ м) проточной части отстойника в случаях отсутствия отражательного щита скорость в центральной трубе не должна превышать 28 мм/с; при наличии щита она может быть повышена до 100 мм/с

С уменьшением величины $v_т$ эффект работы отстойников при прочих равных условиях повышается

Площадь отстойника определяется из уравнения

$$F = Q\left(\frac{1}{v_p} + \frac{1}{v_т}\right)$$

где Q – расход сточной воды, м^3/с.

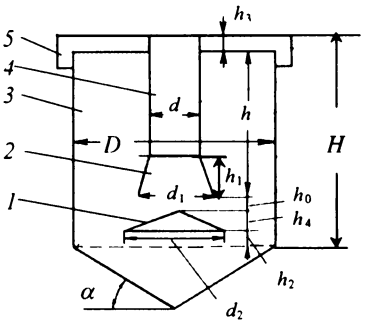
Высота рабочей части отстойника h зависит от значений $v_р$ и t: $h = v_р \cdot t$.

Отражательный щит *2* располагают с таким расчетом, чтобы скорость движения воды в щели между кромкой центральной трубы и поверхностью щита не превышала 40 мм/с; обычно высота щели составляет 0,25-0,5 м

Для защиты выпавшего осадка от взмучивания предусматривается так называемый буферный слой *1* Высота его, считая от низа отражательного щита, не превышает 0,3 м, при отсутствии щита она может достигать 1 м (в зависимости от характера осадка)

Наклон стенок конусной части отстойников определяется характером выпадающего в отстойнике осадка и способом его удаления, чаще всего он составляет 45-60°

Угол наклона поверхности отражательного щита принимают в соответствии с углом естественного сползания осадка под водой, т е таким же, как и угол наклона днища отстойника.



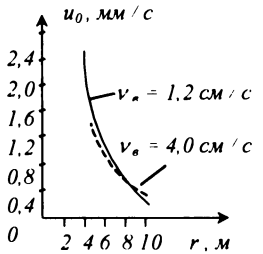


Рис 3 20 Расчетная схема вертикального отстойника·
1 отражательный щит; *2* - раструб, *3* - корпус отстойника, *4* - центральная труба, *5* - желоб для отвода осветленной воды

Рис 3 21 Зависимость радиуса отстойника (r) от расчетной скорости осаждения u_0

Для отвода осветленной воды обычно служит периферийный желоб, при диаметре отстойника более 6 м целесообразно предусматривать дополнительные сборные желоба (радиальные или кольцевые)

Вода в них поступает через водосливную стенку по всей длине желоба или через щели в его стенках Щели располагаются на половине глубины желоба, высота щелей обычно не превышает 0,05 м Удаление осадка из отстойников в большинстве случаев производится путем его выдавливания Необходимое для этого гидростатическое давление зависит от физических свойств осадка и продолжительности периода его пребывания в отстойнике Для большинства видов производственных сточных вод гидростатическое давление составляет 1-2 м

Второй метод, расчета вертикальных отстойников (С Шифрин) основан на предположении, что процесс осаждения взвешенных веществ заканчивается в зоне горизонтального движения сточной жидкости от места выхода ее из щели между центральной трубой и отражательным щитом до стенки отстойника. Исходными расчетными величинами являются наименьшая скорость осаждения (u_0) частиц, на задержание которых рассчитывается отстойник, и высота потока воды, движущегося от центральной трубы к стенкам отстойника

Величина u_0 определяется в зависимости от требуемого эффекта задержания взвешенных веществ и данных о кинетике их осаждения

Высота движущегося слоя воды зависит от многих факторов высоты щели, начальной скорости (при выходе воды из центральной трубы) потока, наклона поверхности отражательного щита, радиуса отстойника и др Для упрощения расчета предложен график (рис 3 21), позволяющий определять необходимый радиус отстойника в зависимости от величины u_0 и начальной скорости входа воды в отстойник $v_в$ (1,2-4 см/с)

Остальные элементы вертикального отстойника по этому методу расчета принимают на основе опытных данных

Цилиндрическую часть отстойника рекомендуется устраивать высотой h, равной $2{,}5d$, но не менее 2,75 м Диаметр центральной трубы d принимают исходя из условия, чтобы скорость воды в ней была в пределах 28-100 мм/с Диаметр отстойника D не должен превышать $3h$.

Отражательный щит располагается на таком расстоянии от центральной трубы, чтобы скорость воды в образовавшейся щели $v_в$ не превышала указанной ранее величины Высота нейтрального слоя не превышает 0,3 м.

Для задержания всплывающих веществ в вертикальных отстойниках предусмотрены полупогруженные стенки (щитки), располагаемые перед водосливными кромками водоприемных желобов на расстоянии 0,2-0,3 м от них

Пример расчета Расчетное количество сточных вод $Q_р$ = 0,1 м^3/с, концентрация взвешенных веществ в неотстоенной воде C_1 = 200 мг/л, в водоем можно выпустить сточные воды с концентрацией по взвешенным веществам C_2 = 40 мг/л, объем осадка равен 0,5 % объема сточной жидкости, продолжительность хранения его в отстойнике не более 3 суток Угол сползания осадка под водой 45° Определить количество и размеры вертикальных отстойников.

Решение по первому методу Требуемый рабочий эффект

$$Э = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100 = \frac{200 - 40}{200} \cdot 100 = 80\ \%$$

По данным кинетики осаждения взвешенных веществ такой эффект может быть достигнут при условии задержания отстойником частиц, выпадающих со скоростью u_0 равной 0,4 мм/с

Требуемая продолжительность отстаивания по тем же данным – t = 2 ч

Примем расчетную скорость протока сточной жидкости в отстойнике $v_р$=0,75u_0=0,3 мм/с

Рабочая площадь всех отстойников

$$F_р = \frac{Q_р}{v_р} \frac{0{,}1}{0{,}0003} = 334\ м^2$$

Скорость движения сточной жидкости в центральной трубе ($v_т$), при условии наличия отражательного щита, примем равной 100 мм/с, количество отстойников n = 8 шт Тогда диаметр отстойника

$$D = \sqrt{\frac{4Q_р}{\pi n}\left(\frac{1}{v_р} + \frac{1}{v_т}\right)} = 7{,}2\ м$$

Высота рабочей части отстойника h = 7200·0,3 ≈ 2,2 м

Диаметр центральной трубы

$$d = \sqrt{\frac{4Q_р}{\pi n v_т}} = 0{,}4\ м$$

Диаметр d_1 (см рис 3 20) раструба в соответствии с действующими нормами равен $1{,}35d = 0{,}54$ м, диаметр отражательного щита $d_2 = 1{,}3 \cdot 0{,}54 \approx 0{,}7$ м Скорость движения сточной жидкости в щели $v_в = 10$ мм/с, тогда высота щели определяется по формуле

$$h_0 = \frac{Q_р}{v_в \pi dn} = \frac{0{,}1}{0{,}04 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}4 \cdot 8} \approx 0{,}25 \text{ м}$$

Угол наклона поверхности отражательного щита α примем равным углу сползания данного осадка под водой, т е 45°. Высота отражательного щита при данных d_2 и угле наклона будет $h_4 = 0{,}35$ м

Высоту нейтрального слоя h_2 примем равной 0,3 м, возвышение бортов отстойника над уровнем воды в нем h_3 равным 0,25 м. Тогда высота цилиндрической части сооружения

$$H \quad h + h_0 + h_2 + h_3 + h_4 \approx 3{,}3 \text{ м}$$

Суточное количество выпадающего осадка равно

$$q_{сут} = 0{,}005 \cdot Q \cdot 86400 \approx 43 \text{ м}^3$$

При продолжительности хранения его в отстойниках в течение 3 суток емкость грязевой части каждого отстойника должна быть не менее 17 м^3 Наклон стенок конусной части отстойника примем равным $\alpha = 45^0$, тогда ее емкость

$$V = \frac{1}{3}\frac{\pi D^3}{8} tg\alpha \approx 49 \text{ м}^3$$

Таким образом, весь накапливаемый осадок размещается в конической части отстойника, занимая около 30 % ее объема.

Нейтральный слой в данном случае можно не предусматривать Тогда полная строительная высота отстойника

$$H_{полн} = h + h_0 + h_3 + h_4 + \frac{D}{2} tg\alpha \approx 6{,}6 \text{ м.}$$

Решение по второму методу. Величину радиуса отстойника, соответствующую принятым значениям скорости осаждения частиц u_0 и скорости при входе воды в отстойник $v_в$, найдем по графику (см рис 3.21)

При $u_0 = 0{,}4$ мм/с и $v_в = 40$ мм/с радиус отстойника $r = 4$ м

Скорость движения сточной жидкости в центральной трубе принимаем 100 мм/с, тогда диаметр ее $d = 0{,}4$ м

Высота рабочей части отстойника может быть равной $h = 2{,}5d$, но не менее 2,75 м, принимаем $h = 2{,}75$ м

Высота конической части отстойника при $D = 8$ м и наклоне ее стенок 45°составит 4 м, емкость ее $V \approx 70$ м^3, т е больше, чем это требуется для размещения осадка

Размеры отражательного щита примем, как и в первом случае $d_2 = 0{,}7$ м, $h_4 = 0{,}35$ м, высоту бортов отстойника $h_3 = 0{,}25$ м, нейтральный слой не предусматривается

Полная высота отстойника $H_{полн} \approx 7{,}6$ м

Пропускная способность одного отстойника при принятых диаметре центральной трубы и скорости протока в ней составит

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v_т \approx 0{,}125 \text{ м}^3/\text{с}$$

Число отстойников

$$n = \frac{Q_р}{Q} = \frac{0{,}1}{0{,}0125} = 8 \text{ шт}$$

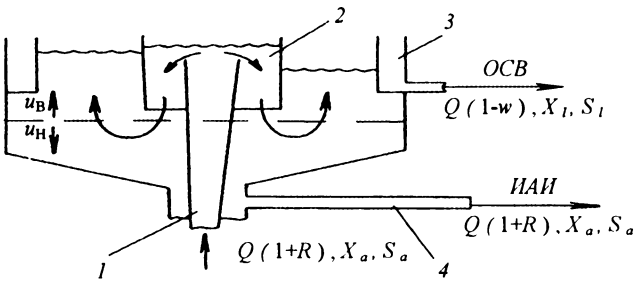


Рис 3 22 Схема радиального отстойника

1 – подводящая труба активного ила с очищенной водой, *2* – направляющий цилиндр, *3* – сборный лоток, *4* – труба откачки возвратного ила, *ОСВ* – очищенная сточная вода, *ИАИ* – избыточный активный ил, все обозначения в тексте к рис 3 18

Радиальные отстойники (рис 3 22) применяют для обработки больших (более 20000 м^3/сутки) объемов воды Они представляют собой круглый (в плане) бассейн, оборудованный подводящим и отводящим воду трубопроводами, водораспределительным и водосборным устройствами

Смесь активного ила с очищенной водой подается в центр отстойника снизу вверх по трубе *1* и направляющий цилиндр *2* Выпадающий в осадок ил с помощью скребков, установленных на подвижной ферме, или самотеком сдвигается в приямок отстойника, далее по трубопроводу *4* удаляется насосами Осветленная вода поступает в круговой сборный лоток *3*

Скорость восходящего потока $u_в = Q(1-w)/F$, скорость нисходящего потока - $u_н = Q(R+w)/F$ (см расчетную схему на рис 3 22, F - площадь сечения отстойника, м^2)

Диаметр радиальных отстойников составляет 15-40 м Отношение диаметра отстойника к глубине его цилиндрической части – от 6 1 до 12 1, глубина проточной части 1,5-5 м Существенным недостатком радиальных отстойников, как и горизонтальных, является резко выраженная струйность потока в них сточной воды и наличие, в связи с этим, дополнительных сопротивлений, тормозящих осаждение нерастворенных примесей Все это снижает эффект работы отстойников

Расчёт площади радиального отстойника производится по формуле

$$F_{ро} = \alpha \frac{Q}{3{,}6u_0} + f,$$

где Q – производительность отстойника, м^3/с, u_0 – расчетная скорость осаждения взвеси в мм/с, f – площадь центральной зоны, где вследствие высокой турбулентности потока не

происходит осаждение взвеси, в м², α – коэффициент, учитывающий влияние вертикальной составляющей скорости потока на эффект осаждения взвеси

$$\alpha = \frac{u_0}{u_0 - w^*}$$

где w^* - среднеквадратичное значение вертикальной составляющей скорости потока в среднем сечении отстойника

В Клячко и Г Павлов предложили рассчитывать радиальные отстойники с учетом непрерывного изменения горизонтальной и вертикальной составляющих скорости потока по длине радиуса отстойника

Горизонтальную составляющую скорости движения воды в любой точке отстойника определяют, исходя из равенства

$$V = \frac{dx}{dt} = \frac{Q}{2\pi x(H - \gamma x)}, \qquad (3\ 13)$$

где x – расстояние от центра отстойника до точки, для которой определяется горизонтальная скорость, H – глубина отстойника в центре, γ – уклон дна отстойника

Скорость осаждения взвеси в радиальном отстойнике будет равна

$$\frac{dy}{dt} = u_0 - w(x), \qquad (3\ 14)$$

где $w(x)$ – средняя величина вертикальной составляющей скорости движения воды в отстойнике, зависящая от значения x

$$w(x) = \frac{Q}{26 \cdot 2\pi\, x(H - \gamma\, x)}$$

Подставив в формулу (3 14) значения $w(x)$, получим

$$\frac{dy}{dt} = u_0 - \frac{Q}{26 \cdot 2\pi\, x(H - \gamma\, x)} \qquad (3\ 15)$$

Решив совместно уравнения (3 13) и (3 15), получим

$$\frac{dx}{dy} = \frac{Q}{2\pi\, x\, u_0 (H - \gamma\, x) - Q/26}$$

Интегрируя последнее выражение в пределах от 0 до R, получим

$$y = -\frac{2\pi\, u_0 \gamma\, R^3}{3Q} + \frac{\pi\, u_0 H}{Q} R^2 - R/26$$

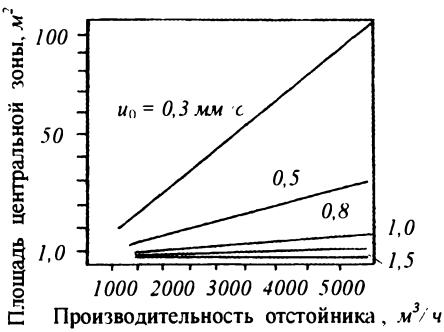
При $x = R$ ордината y равна высоте отстойника у сборного желоба (h)

$$h = H - \gamma R$$

После соответствующих преобразований в окончательном виде расчетное уравнение для радиальных отстойников получает вид

$$\frac{2\pi\, u_0 \gamma}{3Q} R^3 - \frac{\pi\, u_0 H}{Q} R^2 + H = 0, \qquad (3\ 16)$$

или, в упрощенной форме, $R = (280Q/u_0)^{0,535}$



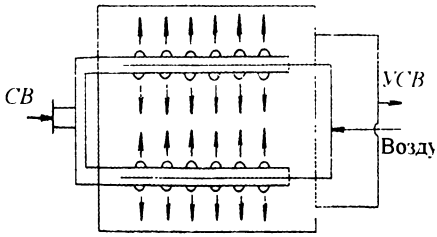


Рис 3 23 Зависимость площади центральной зоны от производительности отстойника и скорости осаждения взвеси u_0

Рис 3 24 Усреднитель с перемешивающим устройством

УСВ - усредненная по объему и концентрации сточная жидкость

Поскольку при выводе расчётного уравнения (3 16) не учитывалось наличие в центре отстойника зоны больших скоростей, в которой осаждения взвеси практически не происходит, для получения искомой площади отстойника необходимо к основной площади круга с радиусом R прибавить площадь центральной зоны ($f_{ц.з}$), которую можно определить по графику (рис 3 23)

$$F_{р.о} = \pi R^2 + f_{ц.з}$$

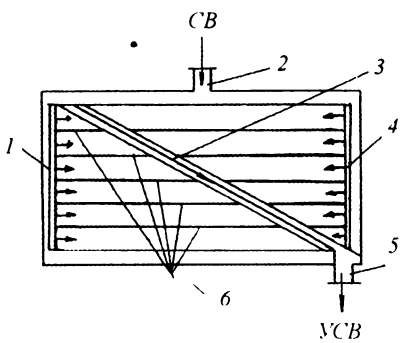
Существуют и другие типы отстойников (многоярусные, спиральные), которые имеют ограниченное применение на станциях биохимической очистки сточных вод

3.4.3. Усреднители, смесители, камеры хлопьеобразования

Для усреднения (выравнивания) концентрации сточных вод и стабилизации расхода применяются пруды и специальные резервуары–усреднители, которые подразделяются на *контактные* и *проточные*

Контактные усреднители применяются при небольших расходах, периодическом сбросе сточных вод и необходимости 100%-ного усреднения концентрации загрязнений В большинстве случаев используются проточные усреднители, которые представляют собой резервуары с перемешивающими устройствами (механическое перемешивание, барботаж) или многокоридорные резервуары.

Проточные усреднители с перемешивающими устройствами работают по принципу полного перемешивания вновь поступающих порций сточных вод с содержимым резервуара Наиболее удобными в эксплуатации являются усреднители с перфорированными трубчатыми барботерами (рис 3 24) Являясь полными усреднителями расхода, они не обеспечивают полного усреднения концентрации загрязнения



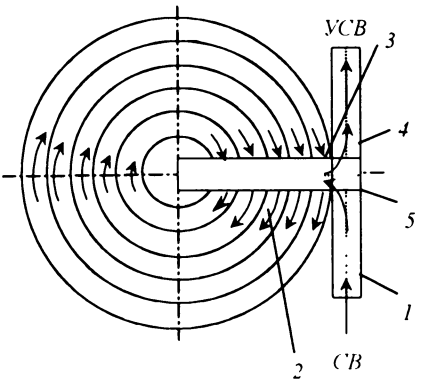


Рис 3 25 Многокоридорный усреднитель Д Ванякина (прямоугольный)

1, 4 – распределительные желоба *2* – канал подачи сточных вод *3* – глухая диагональная перегородка *5* – канал отвода усредненной *СВ*, *6* – продольные вертикальные перегородки

Рис 3 26 Многокоридорный усреднитель (круглый)

1 – канал подачи сточных вод, *2* – распределительный желоб, *3* – сборный желоб, *4* – канал отвода усредненной *СВ* *5* – глухая радиальная перегородка

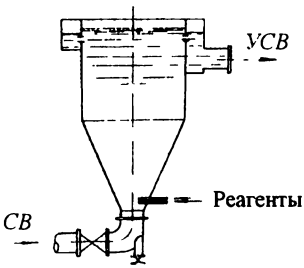
Многокоридорные усреднители бывают прямоугольные (рис 3 25) и круглые (рис 3 26) Усреднение концентраций загрязнений в них достигается за счет смешения струй разной концентрации, поступающих в усреднитель в разное время В каждой половине усреднителя должно быть 5-6 коридоров

Конструкцию усреднителя для каждого конкретного случая подбирают в зависимости от количества и качества очищаемой сточной воды

Смесители предназначены для равномерного распределения реагентов в объеме обрабатываемой воды В практике водоочистки применяются в основном шайбовые, вертикальные, дырчатые и перегородчатые смесители (рис 3 27, 3 28)

Смесители вертикального типа могут быть квадратного или круглого в плане сечения, с пирамидальной или конической нижней частью Центральный угол между наклонными стенками должен составлять 30-45°С Обрабатываемая вода по трубопроводу подводится в нижнюю часть смесителя (рис 3 27), это создает турбулентное движение воды, способствующее смешиванию с введенными в нее реагентами

Смеситель дырчатого типа выполняется в виде лотка с тремя вертикальными перегородками (рис 3 28) Наличие в перегородках нескольких рядов отверстий позволяет создать большое число мелких вихрей, способствующих хорошему смешиванию реагентов с водой Скорость движения воды в отверстиях перегородок V_0 = 1 м/с Чтобы избежать насыще-



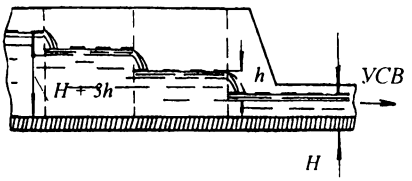


Рис 3.27 Вертикальный (вихревой) смеситель
Рис 3 28. Дырчатый смеситель.

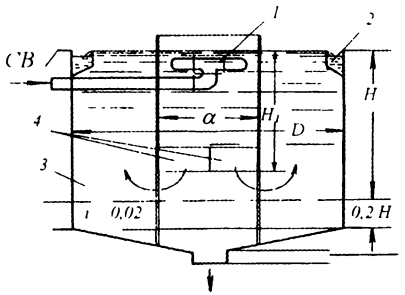
ния воды пузырьками воздуха, верхний ряд отверстий должен быть затоплен на глубину 0,1-0,15 м Диаметр отверстий принимается равным 20-120 мм.

По принципу действия камеры хлопьеобразования подразделяются на гидравлические и механические

К *гидравлическим* относятся водоворотные, вихревые и перегородчатые камеры. Водоворотные камеры хлопьеобразования представляют собой вертикальный цилиндр, в верхнюю часть которого из смесителя вводится сточная вода. Вода, смешанная с реагентами, поступает в камеру по трубопроводу, который на конце снабжен насадками (соплами) Насадки установлены так, что вода, выходя из них с большой скоростью, приобретает внутри камеры вращательное (водоворотное) движение, обеспечивающее перемешивание Обычно такая водоворотная камера выполняется в виде трубы,расположенной в центре вертикального отстойника(рис 3 29). В нижней части камеры перед выходом воды в отстойник находятся гасители вращательного движения Время пребывания воды в камере составляет 15-20 мин

Вихревая камера хлопьеобразования (рис 3 30) имеет форму обратной пирамиды или конуса с углом между стенками $\alpha = 30\text{-}45^0$ верхняя надставка – с вертикальными стенками Скорость движения воды по трубопроводу, подающему ее от смесителя к камере хлопьеобразования, должна быть 0,8-1 м/с, а при входе в нижнюю часть камеры – 0,7 м/с Скорость восходящего потока на выходе из камеры V = 4-5 мм/с Процесс хлопьеобразования в вихревой камере заканчивается за 6-10 мин, т е значительно быстрее, чем в камерах описанных выше типов

Недостатками рассмотренных гидравлических камер хлопьеобразования являются сильная зависимость структуры потоков от расхода обрабатываемой воды, а также невозможность изменять интенсивность турбулизации при изменении внешних условий (температура воды, концентрация загрязнений и т д)



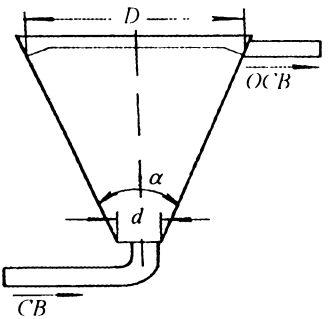


Рис 3 29 Водоворотная камера хлопьеобразовани
1 – сопло ускорителя, *2* – сборный лоток, *3* – отстойник, *4* – гаситель
Рис 3 30 Вихревая камера хлопьеобразования

Среди *механических камер хлопьеобразования* наибольшее распространение получили лопастные В них вода перемешивается лопастями, вращающимися вокруг вертикальных или горизонтальных осей с окружной скоростью 0,4-0,55 м/с

Для механических камер хлопьеобразования характерно 1) формирование потоков с крупномасштабными вихрями, препятствующими столкновению мелкодисперсных частиц, 2) разрушение уже сформировавшихся крупных хлопьев, 3) неравномерное, распределение потока воды по поперечному сечению аппарата (в камерах с восходящим слоем осадка), 4) наличие в камерах зон с различной степенью турбулизации потока (у оси мешалок низкий градиент скорости и, как результат, – формирование застойных зон, а непосредственно у краев лопастей очень высокое напряжение сдвига, в результате чего сформировавшиеся хлопья в этих местах разрушаются)

Все эти недостатки приводят к большому разбросу формирующихся хлопьев по размерам, что отрицательно влияет на качество очистки сточных вод

Таким образом, анализ работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных оптимальному проектированию как отдельных элементов очистных сооружений, так и сложных систем в целом, показал

– отсутствие математических зависимостей и их систематизации по гидродинамике и кинетике массопередачи, структуре потоков в аэротенках, системе «аэротенк-отстойник» и т д при разных способах организации потоков,

– отсутствие научных основ для автоматизированного проектирования водообеспечения промышленных предприятий с использованием современных методов математического моделирования и системного анализа

Глава 4

Математическое моделирование процесса биохимической очистки сточных вод

Промышленное применение микроорганизмов заключается в контролируемом проведении биохимических превращений органических веществ с участием микроорганизмов и ферментов Один из наиболее типичных примеров промышленного применения микроорганизмов – биохимическая очистка сточных вод Органические вещества, содержащиеся в бытовых и промышленных сточных водах, являются основным углеродсодержащим субстратом для роста и развития микроорганизмов активного ила В процессе жизнедеятельности микроорганизмов образуется биомасса – избыточный активный ил и CO_2

Биохимическая очистка сточных вод – процесс эффективный и перспективный Микроорганизмы в метаболических превращениях проявляют исключительно высокую активность, которая связана с их способностью быстро размножаться При этом они перерабатывают органические вещества со скоростью, пропорциональной скорости их роста Возможность биохимической очистки сточных вод зависит от вида и состава органических веществ и подходящего соотношения их основных элементов, необходимых для микроорганизмов в качестве источника питания Присутствующие в бытовых водах и в значительной части промышленных вод органические вещества пригодны для жизнедеятельности микроорганизмов

Как известно, биохимическая очистка реализуется технически двумя путями – либо в биофильтрах, либо в биобассейнах Основная разница между ними состоит в способе культивирования микроорганизмов В биофильтрах микроорганизмы фиксированы на поверхности инертного материала В биобассейнах (биореакторах) микроорганизмы культивируются как свободно плавающие суспендированные бактериальные флоккулы Основную роль тут играют структура потока сточных вод, кинетика процессов при трансформации органических веществ, а также скорость растворения кислорода в сточных водах

Динамика развития микроорганизмов и их физиологическое состояние находятся в прямой зависимости от способа подачи кислорода – непрерывно или периодично Если не вводят дополнительное количество субстрата, микроорганизмы в самом начале быстро размножаются в условиях избытка питательных веществ, затем этот процесс замедляется В результате изменения питательной среды микроорганизмы, появившиеся в начальных условиях, отличаются от тех, которые появились впоследствии

Для успешного решения задач, связанных с прогнозированием, планированием, оперативным управлением и контролем за качеством водной среды, необходимо комплексное описание гидродинамических, гидробиологических и микробиологических процессов в водоемах и аппаратах Для такого описания используют методы математического моделирования и

системного анализа Применение математических моделей позволяет учесть те или иные особенности процесса очистки, более правильно описать экспериментальные результаты Направленность моделирования проявляется как в выборе математического аппарата, так и в уровне детализации структуры объекта

Принципы построения математических моделей процесса очистки сточных вод. Построение математической модели начинают с составления формализованного описания процессов, составляющих основу математического аппарата

Вначале исследуют гидродинамическую модель процесса как основу структуры математического описания Далее изучают кинетику химических реакций, процессов массо- и теплопередачи с учетом гидродинамических условий найденной модели и составляют математическое описание каждого из этих процессов Заключительным этапом является объединение всех исследованных "элементарных" процессов (блоков) в единую систему уравнений математического описания объекта моделирования

Для математического описания, разработанного на основе анализа химической и физической природы моделируемого объекта, можно выделить следующие группы уравнений

1) уравнение баланса количества движения

$$\frac{\partial U_x}{\partial \tau} = -\left(U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z}\right) + \nu \nabla^2 U_x + \left(g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}\right),$$

где U_x – скорость движения среды вдоль оси x, ν – транспортный коэффициент (вязкость), $\nu\nabla^2 U_x$ – сила вязкого трения, $(g - (1/\rho)(\partial p/\partial x))$ – сила внешнего давления.

2) уравнение энергетического баланса для элементарного объема движущейся среды

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -\left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} + U_z \frac{\partial t}{\partial z}\right) + a\nabla^2 t + \frac{q_r}{\rho C_p},$$

где t – температура среды, a – коэффициент температуропроводности ($a = \lambda/(C_p\rho)$), $a\nabla^2 t$ – молекулярный перенос энергии, q_r – мощность источника тепла в среде.

3) уравнение материального баланса по i-му компоненту элементарного объема движущейся среды

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -\left(U_x \frac{\partial C_i}{\partial x} + U_y \frac{\partial C_i}{\partial y} + U_z \frac{\partial C_i}{\partial z}\right) + D_i \nabla^2 C_i + r_{in},$$

где C_i – концентрация i-го компонента в среде, D_i – коэффициент диффузии $D_i\nabla^2 C_i$ – молекулярный перенос массы, r_{in} – скорость образования i-го компонента в единице объема

В целом эти уравнения применимы к любым процессам – естественно, при учете ограничений, обусловленных особенностями конкретного процесса геометрией аппарата, физическими характеристиками системы, условиями взаимодействия с окружающей средой, условиями начала отсчета При математическом описании процессов, происходящих в системе водоочистки, нужно учитывать, что биологическая система очистки сточных вод качественно отличается от систем неживой природы Это многокомпонентные, многофакторные саморегулирующиеся и многоуровневые

системы, находящиеся в постоянном материальном и энергетическом обмене с окружающей средой. Поведение популяции микроорганизмов, участвующих в процессах изъятия загрязнений, как и поведение любой другой биологической системы, исключительно многогранно В ходе роста и развития популяции накапливается биомасса, изменяется состав окружающей среды, передается в популяцию наследственная информация, осуществляются процессы мутации и селекции, идет борьба за существование, при этом протекают и другие процессы, которые характеризуют эту систему и могут представлять интерес при различных исследованиях

Более подробно кинетические закономерности процесса изъятия субстрата микроорганизмами и особенности их математического описания будут рассмотрены ниже

Другой отличительной особенностью математического моделирования систем биологической очистки является то, что приходится учитывать нестационарность состава, содержания и расхода сточных вод, поступающих на очистку

4.1. Математическое моделирование аэротенка

При математическом моделировании аэротенка его можно рассматривать как биохимический реактор, имеющий все те особенности, о которых говорилось выше. Здесь необходимо добавить, что процесс очистки сточных вод активным илом неоднороден, поскольку часть компонентов подвергается быстрому бактериальному окислению (уксусная кислота, *н*-бутанол, различные углеводы), тогда как другие компоненты (углеводороды различного строения, высшие спирты, жирные кислоты и т д) окисляются с трудом и довольно долго остаются в активном иле В результате механизм взаимодействия многовидового микробного ценоза и многокомпонентного субстрата до сих пор полностью не раскрыт Поэтому для упрощения кинетических зависимостей, необходимых для расчета, нужно рассматривать состав стоков по усредненному показателю БПК (г/м^3), а состав активного ила – по общей концентрации (г/м^3)

Изъятие из сточной жидкости крупных взвешенных частиц и большей части загрязнений, находящихся в коллоидном состоянии, происходит в результате сорбционных процессов при столкновении хлопьев активного ила с частицами органических загрязнений Поэтому условиями нормального протекания процесса биоокисления будут условия равномерного распределения хлопьев активного ила по всему объему аэротенка при обеспечении переноса к ним растворенного кислорода и субстрата В то же время плотность хлопьев активного ила несколько превышает плотность воды, в результате чего происходит оседание активного ила под действием силы тяжести. Для предотвращения оседания в аэрационных сооружения должно быть предусмотрено интенсивное перемешивание Такие условия обеспечиваются при интенсивной пневматической или пневмомеханической аэрации.

Гидродинамическая обстановка в сооружении будет формироваться в зависимости от способа и интенсивности аэрации, а также геометрии аэротенка и организации подачи потоков Мнения по поводу структуры по-

токов в аэротенках носят противоречивый характер (от идеального смешения до идеального вытеснения, включая промежуточное состояние) Поэтому необходима гибкая комбинированная математическая модель структуры потоков, которая может изменяться в зависимости от гидродинамической обстановки в аэротенке При разработке такой модели для процесса очистки сточных вод в аэротенках необходимо принять допущение, что структура потоков по активному илу и по субстрату одинакова

Таким образом, математическая модель аэротенка в целом формируется на основе кинетической модели окисления субстрата микроорганизмами и гидродинамической модели аэротенка

4.1.1. Математическая модель продольного перемешивания в ограниченном канале с несколькими зонами смешения

При исследовании аэротенков с барботажной аэрацией обычно определяют усредненный коэффициент продольного перемешивания, хотя в реальных условиях он может быть различным на разных участках Обычная диффузионная модель в этих случаях недостаточно точно отражает физическую сущность процесса

Для оптимизации процесса продольного перемешивания выявляют участки с наихудшей для осуществления процесса гидродинамикой Для этого определяют коэффициенты продольного перемешивания на отдельных участках аппарата

Схема модели, представляющей ограниченный канал (аппарат), состоящий из n зон с различной интенсивностью перемешивания, показана на рис 4 1 Материальный баланс по трассеру (индикатору) для отдельных зон описывается следующими уравнениями

$$D_1 \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial \tau}, \quad 0 \le z \le z_1,$$

.....

$$D_k \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial \tau}, \quad z_{k-1} \le z \le z_k,$$

.....

$$D_n \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial \tau}, \quad z_{n-1} \le z \le z_n$$

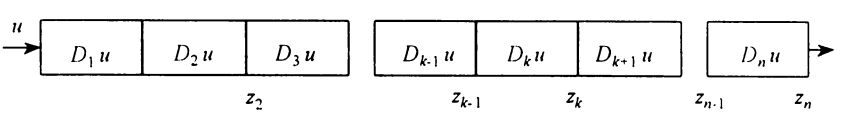


Рис 4 1 Схема модели продольного перемешивания в ограниченном канале с n зонами смешения

Граничные условия

$$D_1\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z=0} - uc_0 = 0,$$

$$D_1\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z,1}^{-} - uc_{z,1}^{-} = D_2\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z,1}^{+} - uc_{z,1}^{+},$$

$$c_{z,1}^{-} = c_{z,1}^{+}$$

.....

$$D_k\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z,k}^{-} - uc_{z,k}^{-} = D_{k+1}\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z,k}^{+} - uc_{z,k}^{+},$$

$$c_{z,k}^{-} = c_{z,k}^{+}$$

.....

$$D_{n-1}\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z,(n-1)}^{-} - uc_{z,(n-1)}^{-} = D_n\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z,(n-1)}^{+} - uc_{z,(n-1)}^{+},$$

$$c_{z,(n-1)}^{-} = c_{z,(n-1)}^{+},$$

$$\left(\frac{\partial c}{\partial z}\right)_{z=L} = 0,$$

где u – линейная скорость потока, м/с; D_k (k = 1, 2,. ,n) – коэффициент продольного перемешивания в k-й зоне аппарата, м^2/с; z,k – координата длины потока жидкости в k-й зоне, м, z,k^-, z,k^+ - координата длины потока, бесконечно близкая к точке z,k слева и справа от нее, м; c – концентрация трассера, г/л

Введя в систему уравнений безразмерные переменные и с учетом импульсной подачи трассера в первую зону в виде функции Дирака $\delta(t)$, получаем.

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_1}\frac{\partial^2 c}{\partial Z^2} - \frac{\partial c}{\partial Z} + \delta(t) = \frac{\partial c}{\partial t};\ 0 \le Z \le Z_1,$$

.....

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_k}\frac{\partial^2 c}{\partial Z^2} - \frac{\partial c}{\partial Z} = \frac{\partial c}{\partial t},\ Z_{k-1} \le Z \le Z_k,$$

.....

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_n}\frac{\partial^2 c}{\partial Z^2} - \frac{\partial c}{\partial Z} = \frac{\partial c}{\partial t},\ Z_{n-1} \le Z \le Z_n$$

Граничные условия

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_1}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z=0} - c_0 = 0,$$

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_1}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z,1}^{-} - c_{Z,1}^{-} = \frac{1}{\mathrm{Pe}_2}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z,1}^{+} - c_{Z,1}^{+},$$

$$c_{Z,1}^{-} = c_{Z,1}^{+},$$

.....

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_k}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z,k}^{-} - c_{Z,k}^{-} = \frac{1}{\mathrm{Pe}_{k+1}}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z,k}^{+} - c_{Z,k}^{+},$$

$$c_{Z,k}^{-} = c_{Z,k}^{+},$$

.....

$$\frac{1}{\mathrm{Pe}_{n-1}}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z,(n-1)}^{-} - c_{Z,(n-1)}^{-} = \frac{1}{\mathrm{Pe}_n}\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z,(n-1)}^{+} - c_{Z,(n-1)}^{+},$$

$$c_{Z,(n-1)}^{-} = c_{Z,(n-1)}^{+},$$

$$\left(\frac{\partial c}{\partial Z}\right)_{Z=1} = 0,$$

где Pe = uL/E, $Z = z/L$ – безразмерная координата длины потока.

При импульсной подаче трассера на входе аппарата ($Z = 0$) уравнения для первого (M_1) и второго (M_2) начальных моментов кривой отклика в любой k-ой зоне имеют вид

$$M_1 = A_k \exp \mathrm{Pe}_k Z + \frac{1}{\mathrm{Pe}_k} + Z, \quad Z_{k-1} \le Z_k, \tag{4 1}$$

где при $k = 1, 2, \ldots, n-1$

$$A_k = \left[\frac{1}{\mathrm{Pe}_{k+1}} + \frac{1}{\mathrm{Pe}_k} + A_{k+1}\exp(\mathrm{Pe}_{k+1} Z_k)\right]\exp(-\mathrm{Pe}_Z Z_k),$$

при $k = n$

$$\mathrm{A}_n = \exp(-\mathrm{Pe}_n) / \mathrm{Pe}_n,$$

$$M_2 = \sum_1^k B_k + \frac{4Z}{\mathrm{Pe}_k} + \frac{4}{\mathrm{Pe}_k^2} + Z^2 - (2A_k Z - C_k)\exp(\mathrm{Pe}_k Z)$$

$$Z_{k-1} \le Z \le Z_k \tag{4 2}$$

при $k = 1$

$$B_1 = -2A_1 / Pe_1,$$

при $k = 2, 3, \ldots, n$

$$B_k = \frac{2Z_{k-1}}{\mathrm{Pe}_{k-1}} - \frac{2Z_{k-1}}{\mathrm{Pe}_k} + \frac{2A_{k-1}}{\mathrm{Pe}_{k-1}} \exp(\mathrm{Pe}_{k-1} Z_{k-1}) - \frac{2A_k}{\mathrm{Pe}_k} \exp(\mathrm{Pe}_k Z_{k-1}),$$

при $k = 1, 2, \ldots, n-1$

$$C_k = 2A_k Z_k - (2A_{k+1} Z_k - C_{k+1}) \exp Z_k (\mathrm{Pe}_{k+1} - \mathrm{Pe}_k) +$$

$$+ \left(B_{k+1} - \frac{4Z_k}{\mathrm{Pe}_k} - \frac{4}{\mathrm{Pe}_k^2} + \frac{4Z_k}{\mathrm{Pe}_{k+1}} + \frac{4}{\mathrm{Pe}_{k+1}^2} \right) \exp(-\mathrm{Pe}_k Z_k),$$

при $k = n$

$$C_n = -\left(\frac{4}{\mathrm{Pe}_n} + \frac{6}{\mathrm{Pe}_n^2} \right) \exp(-\mathrm{Pe}_n)$$

Уравнения (4 1) и (4 2) позволяют по экспериментальным кривым отклика, зафиксированным на отдельных участках аппарата, определять интенсивность продольного перемешивания Так, фиксируя кривые отклика в сечениях $Z_1, Z_2, \ldots, Z_k, \ldots, Z_n = 1$, можно по величине приращения безразмерной дисперсии на каждом участке $\Delta\sigma_\theta^2 = \sigma_{Z,k}^2 - \sigma_{Z,(k-1)}^2$ последовательно, начиная с конечного участка, рассчитать все значения Pe_k и D_k Необходимая для расчета зависимость $\Delta\sigma_\theta^2$ от параметров модели следует из уравнений (4 1), (4 2) Общее выражение $\Delta\sigma_\theta^2$ для любого k-го участка аппарата имеет вид

$$\Delta\sigma_\theta^2 = \sigma_{Z,k}^2 - \sigma_{Z,(k-1)}^2 = \frac{2(Z_k - Z_{k-1})}{\mathrm{Pe}_k} + (4A_k Z_{k-1} + \frac{2A_k}{\mathrm{Pe}_k} - C_k) \exp \mathrm{Pe}_k Z_{k-1} -$$

$$- (4A_k Z_k + \frac{2A_k}{\mathrm{Pe}_k} - C_k) \exp \mathrm{Pe}_k Z_k + A_k^2 (\exp 2\mathrm{Pe}_k Z_{k-1} - \exp 2\mathrm{Pe}_k Z_k) \qquad (4\,3)$$

В это уравнение, кроме Pe изучаемого участка, входят также Pe последующих участков, поэтому можно найти все значения Pe_k Для аппаратов большой длины (большие Pe_k) уравнение (4 3) упрощается, и Pe_k определяется в явном виде При исследовании аппаратов малой длины (небольшие Pe_k) приходится решать уравнение (4 3) графическим способом В результате определяют средние значения коэффициентов продольного перемешивания для отдельных участков аппарата Для последнего (по ходу потока) участка уравнение (4 3) приводится к виду

$$\Delta\sigma_\theta^2 = \sigma_{Z=1}^2 - \sigma_{n-1}^2 = \frac{2(1 - Z_{n-1})}{\mathrm{Pe}_n} - \frac{5}{\mathrm{Pe}_n^2} + \left\{ \frac{4(1 - Z_{n-1})}{\mathrm{Pe}_n} + \frac{4}{\mathrm{Pe}_n^2} \right\} \times \qquad (4\,4)$$

$$\times \exp[-\mathrm{Pe}_n (1 - Z_{n-1})] + \exp[-2\mathrm{Pe}_n (1 - Z_{n-1})] / \mathrm{Pe}_n^2$$

Часто два последних члена уравнения (4 4) бывают весьма малы, тогда

$$\mathrm{Pe}_n = \frac{1 - Z_{n-1}}{\Delta\sigma_\theta^2} + \sqrt{\left(\frac{1 - Z_{n-1}}{\Delta\sigma_\theta^2}\right)^2 - \frac{5}{\Delta\sigma_\theta^2}}$$

Для аппаратов, состоящих из двух участков с разной интенсивностью продольного перемешивания, на основе уравнений (4 1) и (4 2) получаем

$$\sigma_{\theta_1}^2 = \frac{2(1 - Z_1)}{\mathrm{Pe}_2} - \frac{2}{\mathrm{Pe}_2^2} + \frac{2}{\mathrm{Pe}_1}\left(Z_1 + \frac{1}{\mathrm{Pe}_2}\right) - \frac{2}{\mathrm{Pe}_2^2} + \left(\frac{1}{\mathrm{Pe}_1} - \frac{1}{\mathrm{Pe}_2}\right) \times$$

$$\times \frac{2\exp(-\mathrm{Pe}_1 Z_1)}{\mathrm{Pe}_1} + \left(\frac{1}{\mathrm{Pe}_2} - \frac{1}{\mathrm{Pe}_1} + \frac{\exp(-\mathrm{Pe}_1 Z_1)}{\mathrm{Pe}_1}\right)\frac{2\exp[-\mathrm{Pe}_2(1 - Z_1)]}{\mathrm{Pe}_2}. \qquad (4\ 5)$$

При больших значениях Pe два последних члена уравнения (4 5) пренебрежимо малы, тогда

$$\mathrm{Pe}_1 = \frac{Z_1 + 1/\mathrm{Pe}_2}{C_1} + \sqrt{\left(\frac{Z_1 + 1/\mathrm{Pe}_2}{C_1}\right)^2 - \frac{2}{C_1}}, \qquad (4\ 6)$$

где $C_1 = \sigma_{\theta_1}^2 + \frac{2}{\mathrm{Pe}_2^2} - \frac{2(1 - Z_1)}{\mathrm{Pe}_2}$

Зная Pe_2, можно по дисперсии функции отклика, зафиксированной в потоке на выходе из аппарата, с помощью уравнения (4 6) найти Pe_1

4.1.2. Экспериментальные исследования гидродинамики в аэротенке

Цель работы

1 Исследовать структуру потока жидкости в четырехкоридорном аэротенке (используются для биологической очистки сточных вод)

2 Рассчитать параметры ячеечной и диффузионной математических моделей, для этого снять экспериментальные функции отклика на импульсное возмущение в жидкой фазе в нескольких точках аэротенка

3 Провести сравнение точности моделей

Описание установки

Установка (рис 4 2) состоит из аэротенка *6*, в который поступает вода через вентиль *1* и ротаметр *2* Постоянство уровня воды в аэротенке поддерживается с помощью уравнительного сосуда *12* Аэрация осуществляется воздухом, подаваемым из воздуходувки *11*, через вентиль *10*, ротаметр *9* и пневмотрубки, расположенные снаружи аэротенка

Для исследования гидродинамического режима на входе потока жидкости в аэротенк вводят раствор KCl посредством пневматического устройства *4* Изменение концентрации соли KCl в коридорах аэротенка фиксируется на диаграммной ленте с помощью электронного потенциометра *7*, который связан с кондуктометрическими датчиками *3* и измерителем электропроводности *8*

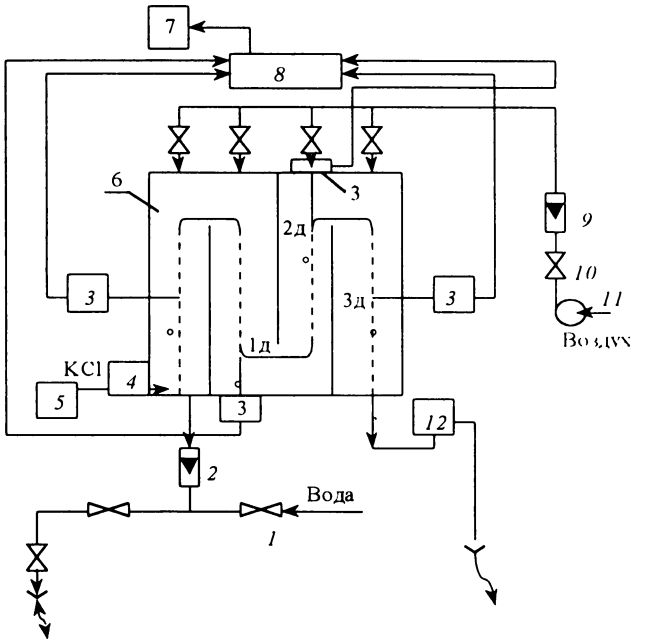


Рис 4 2 Установка по исследованию структуры потока жидкости в аэротенке
1 – вентиль подачи воды, *2, 9* – ротаметры, *3* - кондуктометрические датчики, *4* – пневматическое устройство *5* - сосуд для индикатора, *6* – аэротенк, *7* – электронный потенциометр, *8* – измеритель электропроводности *10* – вентиль подачи воздуха, *11* – воздуходувка, *12* – уравнительный сосуд (см также пояснения в тексте)

Методика исследования

Используется метод импульсного возмущения (δ-функции Дирака) и в трех точках по длине аэротенка (1д, 2д, 3д на рис 4 2) снимаются С-кривые

Порядок выполнения эксперимента

1 Открыть вентиль *1* и по ротаметру *2* установить требуемый расход воды

2 Заполнить аэротенк 6 до требуемого уровня

3 Уровень воды в аппарате поддерживать с помощью уравнительного сосуда *12*

4 Включить воздуходувку *11*

5 Включить блок питания измерителя электропроводности *8* и электронного потенциометра *7*

6 Приготовить индикатор – водный раствор KCl концентрации 0,2 г/л

7 Залить приготовленный раствор в сосуд *5* и включить подачу сжатого воздуха

8 Ввести индикатор на вход потока жидкости, на диаграммной ленте зафиксировать время подачи трассера (давление в сосуде *5* должно быть 0 2 МПа)

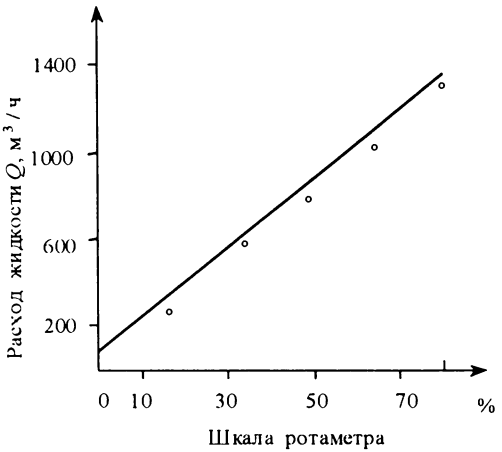


Рис 4 3 Градуировочный график ротаметра жидкости

9 Произвести запись кривых отклика на импульсное возмущение в трех точках.

Для уменьшения погрешности в определении параметров моделей необходимо, чтобы длительность эксперимента $t_э$ составляла

$$t_э = 3\bar{t} = 3V_{ап} / Q,$$

где $V_{ап}$ – объем жидкости в аэротенке, Q – расход воды (градуировочный график приведен на рис 4 3)

10 Измерить скорость диаграммной ленты потенциометра *7*

Выключение установки

1 Закрыть вентиль *1*, подающий воду в аэротенк

2. Выключить воздуходувку *11*, потенциометр *7* и блок питания *8*

3 Слить воду из аппарата через сосуд *12*

Анализ и обработка результатов эксперимента

1 С помощью ЭВМ для полученных трех C-кривых найти среднее время пребывания и безразмерные дисперсии в трех точках (1д, 2д, 3д на рис 4 2) по формулам

$$\bar{t}_{1,2,3} = \frac{\int_0^\infty tc(t)dt}{\int_0^\infty c(t)dt} = \frac{\sum t_i c_i}{\sum c_i}, \qquad (4\,7)$$

$$\sigma^2_{\theta 1,2,3} = \frac{\int_0^\infty t^2 c(t)dt \Big/ \int_0^\infty c(t)dt}{\bar{t}^2} - 1$$

2 По C-кривой датчика (3д) рассчитать количество введенного индикатора g

$$g = Q\int_0^\infty c(t)dt \approx Q\sum_{i=1}^{n} c_i \Delta t \qquad (4\,8)$$

При обработке C-кривых следует учесть, что отсечение "хвоста" кривой приводит к большой погрешности, а именно к завышению числа Ре или числа ячеек (N) Погрешность зависит от соотношения $c_к / c_m$ (где $c_к$ –

конечная концентрация индикатора ("хвоста"), а c_m – максимальная концентрация индикатора) следующим образом

$c_к/c_m$	0,1	0,01	0,001
Погрешность, %	60,0	9,0	2,0

Так как в реальных условиях для аэротенка (см рис 4 2) $c_m \approx 0{,}2$ г/л, то $c_к$ должна составить 0,002 г/л

3 Рассчитать среднее время пребывания $\bar{t}$ и количество введенного индикатора g по формулам

$$\bar{t} = V_{ап}/Q, \qquad (4\ 9)$$

$$g = c_и q_и t_и, \qquad (4\ 10)$$

где $q_и$, $c_и$ и $t_и$ – соответственно расход, концентрация и время подачи трассера (индикатора) через пневмоустройство *12*

4 Сравнить значения среднего времени пребывания $\bar{t}$ и количество введенного индикатора g, полученные по экспериментальным C-кривым (4 7) и (4 8), с рассчитанными по формулам (4 9) и (4 10) и оценить наличие в аэротенке застойных зон, байпаса, рецикла с учетом погрешности экспериментальных данных

5 Рассчитать число ячеек по C-кривой датчика 3д для ячеечной модели структуры потоков по формуле

$$N = \frac{1}{\sigma^2_{\theta_3}}$$

6 Сравнить C-кривую датчика 3д (см. рис.4 2), построив график теоретической C-кривой в соответствии с выражением

$$c = \frac{c_н N^N t^{N-1}}{\bar{t}^{N-1}(N-1)!} \exp\left(-\frac{Nt}{\bar{t}}\right),$$

где $c_н = g/V_{ап}$

7 Рассчитать параметры диффузионной модели. Для исключения ошибок, связанных с трудностью подачи точного (идеального) импульса, найти функцию распределения как разность дисперсий для двух точек по длине аэротенка (датчики 1д и 2д)

$$\Delta\sigma^2_\theta = \sigma^2_{\theta 2} - \sigma^2_{\theta 1}$$

Для аппарата конечной длины (открытый сосуд) [см разд 4 1 1, уравнение (4 4) при условии $Z_{n-1} = 0$], которым является аэротенк, связь числа Pe, характеризующего продольное перемешивание, с приращением безразмерной дисперсии $\Delta\sigma^2_\theta$ имеет вид

$$\Delta\sigma^2_\theta = \frac{\Delta\sigma^2_t}{\bar{t}^2_2} = \frac{2}{\mathrm{Pe}} + \frac{1}{\mathrm{Pe}}[\exp(-2\mathrm{Pe}) + 4\exp(-\mathrm{Pe}) + 4\mathrm{Pe}\cdot\exp(-\mathrm{Pe}) - 5] \qquad (4\ 11)$$

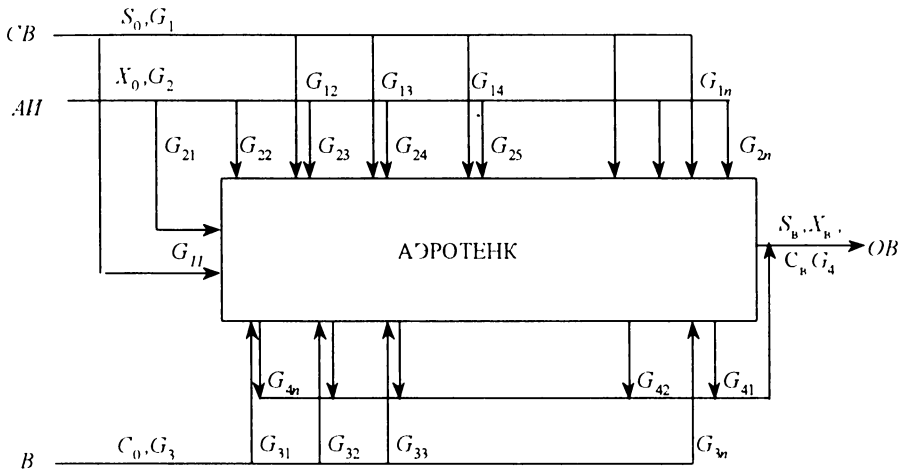


Рис 4 4 Обобщенная схема организации потоков аэротенка

СВ – сточная вода, *АИ* – активный ил, *ОВ* - очищенная вода, *В* - воздух, G_1 – общий расход поступающей сточной воды в аэротенк, м³/ч, G_2 - общий расход поступающего ила в аэротенк, м³/ч, G_3 – общий расход воздуха, подаваемого на аэрацию, м³/ч, G_4 – общее количество очищенной жидкости, м³/ч, G_{1i}, G_{2i}, G_{3i} соответственно расход сточной воды, активного ила и воздуха, подаваемого в аэротенк в каждой точке, м³/ч G_{4i} – количество очищенной жидкости, выводимой из каждой точки аэротенка, м³/ч, S_0, X_0, C_0 – концентрации сточной воды по БПК$_5$, концентрация активного ила и содержание кислорода в воздухе на входе в аэротенк, г/м³ $S_в$, $X_в$, $C_в$ – то же на выходе из аэротенка, г/м³

Формула (4 11) является точным уравнением связи числа Pe и $\Delta\sigma_\theta^2$, при больших значениях числа Pe вторым членом можно пренебречь Погрешность расчета числа Pe при отбрасывании второго члена составляет 2,5 % при Pe = 100 и 25 % при Pe = 10 Поскольку в лабораторной установке число Pe меньше 10, расчет следует проводить по точной формуле (4 11)

8 Рассчитать коэффициент продольного перемешивания D, м^2/с

$$D = ul/\mathrm{Pe},$$

где u – средняя скорость жидкости в аэротенке, м/с, l – расстояние между датчиками 2д и 1д, м

9 Сравнить параметры математических моделей по точному уравнению связи, подставив в него значение числа Pe

$$\frac{1}{N} = \frac{2}{\mathrm{Pe}} - \frac{2}{\mathrm{Pe}^2} + \frac{2\exp(-\mathrm{Pe})}{\mathrm{Pe}^2}$$

Данные, необходимые для расчета, следующие u = 0,0074 м/с, l =0,9 м, Q = 0,6 м^3/ч, $V_{ап}$ = 0,1 м^3, скорость диаграммной ленты – 600 мм/ч, $q_и$ = 18,6 мл/с, $t_и$ = 15 с, $c_и$ = 30 г/л

4.1.3. Гидродинамическая модель аэротенка

Представим обобщенную схему возможных вариантов организации потоков в аэротенках (рис.4.4).

В зависимости от значений величины G_{1i}, G_{2i} и G_{4i} данная схема может деформироваться в более простые Например, если $G_{1i} = G_{2i} = G_{4i} = 0$, а $i = 2,3,4,\ \ , n$, то $G_1 = G_{1i}$, $G_2 = G_{2i}$ и $G_4 = G_{4i}$, что соответствует режиму сосредоточенной подачи сточной воды и активного ила при сосредоточенном отводе очищенной жидкости (рис 4 5*а*) Если $G_{11} = G_{21} = G_{41} = 0$, то

$$\sum_{i=2}^{n} G_{1i} = G_1,\ \sum_{i=2}^{n} G_{2i} = G_2 \text{ и } \sum_{i=2}^{n} G_{4i} = G_4,$$

что соответствует режиму рассредоточенной подачи сточной воды и активного ила при рассредоточенном выводе очищенной жидкости (смотри рис 4 5*б*) Если

$$G_{1i} = \sum_{i=2}^{n} G_{2i} = \sum_{i=2}^{n} G_{4i} = 0,$$

то работа аэротенка осуществляется в режиме с рассредоточенной подачей сточной воды и сосредоточенной подачей активного ила при сосредоточенном выводе очищенной жидкости (рис 4 5*в*). Если

$$\sum_{i=2}^{n} G_{1i} = G_{2i} = \sum_{i=2}^{n} G_{4i} = 0,$$

то осуществляется сосредоточенная подача сточной воды при рассредоточенной подаче активного ила и сосредоточенном отводе очищенной жидкости (рис 4 5*г*)

Для вывода уравнения модели аэротенка в общем виде составим материальный баланс для элемента аппарата *dl*, как это показано на рис 4 6, по субстрату (*S*), активному илу(*X*) и кислороду (*C*)

$$GS + FD\frac{dS}{dl} + FD\frac{d^2S}{dl^2}dl + S_0\nu_1(l)dl - FD\frac{dS}{dl} - GS - G\frac{dS}{dl}dl - S\frac{dG}{dl}dl -$$

$$-\frac{dG}{dl}\frac{dS}{dl}dl^2 - W_1(S,X,C)Fdl = 0,$$

$$GX + FD\frac{dX}{dl} + FD\frac{d^2X}{dl^2}dl + X_0\nu_2(l)dl - FD\frac{dX}{dl} - GX - G\frac{dX}{dl}dl - X\frac{dG}{dl}dl -$$

$$-\frac{dG}{dl}\frac{dX}{dl}dl^2 + W_2(S,X,C)Fdl = 0,$$

$$GC + FD\frac{dC}{dl} + FD\frac{d^2C}{dl^2}dl + KC_0\nu_3(l)dl - FD\frac{dC}{dl} - GC - G\frac{dC}{dl}dl - C\frac{dG}{dl}dl -$$

$$-\frac{dG}{dl}\frac{dC}{dl}dl^2 - W_3(S,X,C)Fdl = 0$$

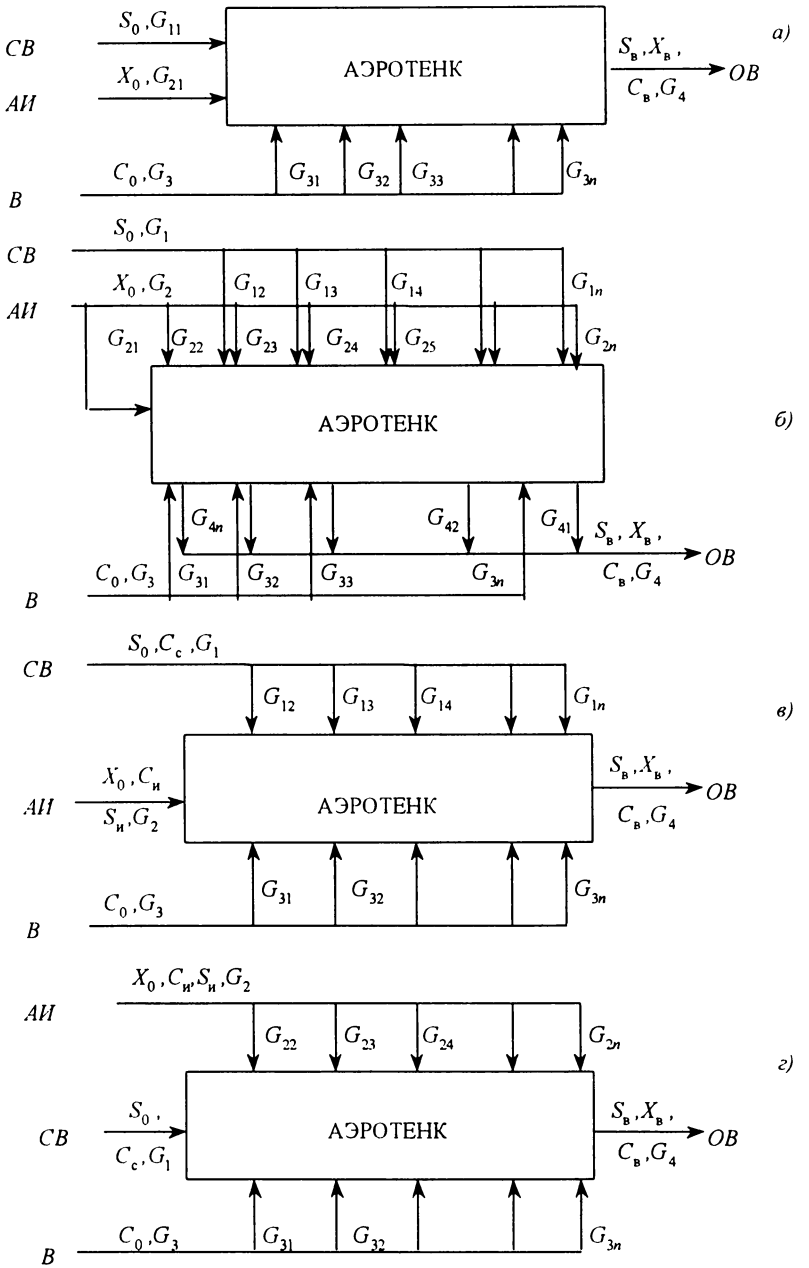


Рис 4 5 Возможные варианты организации подачи потоков в аэротенк

$S_и$ – остаточная концентрация загрязнения в иловой массе, г/м³, $C_и$, C_c – концентрация кислорода в иловой массе, в сточной воде, соответственно, г/м³, все остальные обозначения см рис 4 4

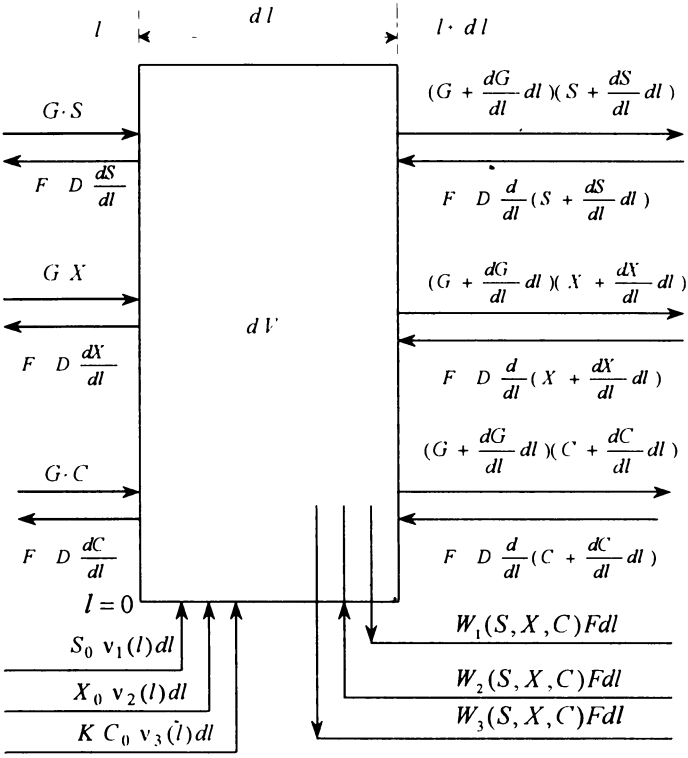


Рис 4 6 К выводу уравнения математической модели

l длина аэротенка, *F* - сечение аэротенка, м², $\nu_1(l)$, $\nu_2(l)$, $\nu_3(l)$ - функции распределения подачи сточной воды активного ила и воздуха, м³/ч, *D* коэффициент продольного перемешивания, м²/ч, $W_1(S,X,C)$, $W_2(S,X,C)$ $W_3(S,X,C)$ кинетика изъятия субстрата, скорость размножения активного ила и скорость потребления кислорода, г/м³ ч, *K* коэффициент, учитывающий использование воздуха в аэротенке, остальные обозначения см рис 4 4

Сократив подобные члены в этой системе уравнений, отбросив члены $dG/dl(dS/dl)dl^2$, $dG/dl(dX/dl)dl^2$, $dG/dl(dC/dl)dl^2$, поделив на Fdl и введя обозначения $G/F = u$ (где u – линейная скорость потока в аэротенке, м/ч), получим математическую модель процесса биохимической очистки сточных вод в аэротенках в виде

$$D\frac{d^2S}{dl^2} + S_0\frac{\nu_1(l)}{F} - u\frac{dS}{dl} - S\frac{du}{dl} - W_1(S,X,C) = 0,$$

$$D\frac{d^2X}{dl^2} + X_0\frac{\nu_2(l)}{F} - u\frac{dX}{dl} - X\frac{du}{dl} + W_2(S,X,C) = 0, \qquad (4\ 12)$$

$$D\frac{d^2C}{dl^2} + KC_0\frac{\nu_3(l)}{F} - u\frac{dC}{dl} - C\frac{du}{dl} - W_3(S,X,C) = 0$$

с граничными условиями

при $l = 0$

$$D\frac{dS}{dl} = u(S - S_0),$$

$$D\frac{dX}{dl} = u(X - X_0),$$

$$D\frac{dC}{dl} = u(C - C_0),$$

при $l = L$

$$\frac{dS}{dl} = \frac{dX}{dl} = \frac{dC}{dl} = 0$$

Величина D, характеризующая продольное перемешивание (в м^2/ч), является параметром модели.

Модель идеального вытеснения. Система уравнений (4 12) с граничными условиями является математической моделью процесса биохимической очистки сточных вод в аэротенках для обобщенного случая организации потоков аэротенка, которая может деформироваться на более простые Так, если величины D, $\nu_1(l)$ и $\nu_2(l)$ равны нулю, то математическая модель (4 12) соответствует режиму идеального вытеснения с сосредоточенной подачей сточной воды и активного ила (см. рис 4 5*а*) и записывается в следующем виде

$$u\frac{dS}{dl} - W_1(S,X,C) = 0,$$

$$u\frac{dX}{dl} + W_2(S,X,C) = 0, \qquad (4\ 13)$$

$$u\frac{dC}{dl} - W_3(S,X,C) - KC_0\nu_3(l)/F = 0$$

с граничными условиями

$$\text{при } l = 0, S = S_{\text{вх}},\ X = X_{\text{вх}},\ C = C_{\text{вх}}$$

где $S_{\text{вх}}$, $X_{\text{вх}}$, $C_{\text{вх}}$ – концентрации сточной воды, активного ила и кислорода на входе в аэротенк в соответствии с рис 4 7, которые рассчитываются по соотношениям

$$S_{\text{вх}} = (S_0G_1 + S_{\text{и}}G_2)/(G_1 + G_2),$$

$$X_{\text{вх}} = (X_0G_2)/(G_1 + G_2), \qquad (4\ 14)$$

$$C_{\text{вх}} = (G_1C_{\text{с}} + G_2C_{\text{и}})/(G_1 + G_2),$$

где $C_{\text{и}}$ – концентрация кислорода в иловой массе, г/м^3, $C_{\text{с}}$ – концентрация кислорода в сточной воде, г/м^3, $S_{\text{и}}$ – остаточная концентрация загрязнения в иловой массе, г/м^3

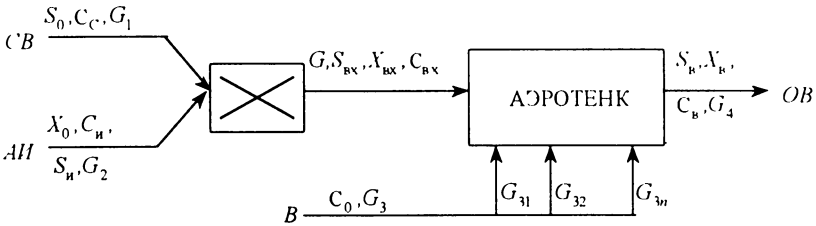


Рис 4 7 Сосредоточенная подача сточной воды и активного ила (обозначения смотри рис 4 5)

Однопараметрическая диффузионная модель. Если в системе (4 12) $D \neq 0$, а $\nu_1(l) = \nu_2(l) = 0$, то математическая модель трансформируется в однопараметрическую диффузионную модель

$$D\frac{d^2S}{dl^2} - u\frac{dS}{dl} - W_1(S,X,C) = 0,$$

$$D\frac{d^2X}{dl^2} - u\frac{dX}{dl} + W_2(S,X,C) = 0, \qquad (4\ 15)$$

$$D\frac{d^2C}{dl^2} - u\frac{dC}{dl} - W_3(S,X,C) + KC_0\nu_3(l)/F = 0$$

с граничными условиями

при $l = 0$

$$D\frac{dS}{dl} = u(S - S_{вх}),$$

$$D\frac{dX}{dl} = u(X - X_{вх}), \qquad (4\ 16)$$

$$D\frac{dC}{dl} = u(C - C_{вх});$$

при $l = L$

$$\frac{dS}{dl} = \frac{dX}{dl} = \frac{dC}{dl} = 0$$

В граничных условиях (4 16) S, X, C – концентрации загрязнений, активного ила и кислорода в аэротенке при $l = 0$ (рис 4 8) Значения величин $S_{вх}$, $X_{вх}$, $C_{вх}$ определяют по выражению (4 14) Такой способ задания граничных условий представляет определенную сложность при интегрировании системы уравнений (4 15), т к значения S, X, C при $l = 0$ неизвестны Метод решения, таким образом, может быть поисковым, что и было использовано в дальнейшем

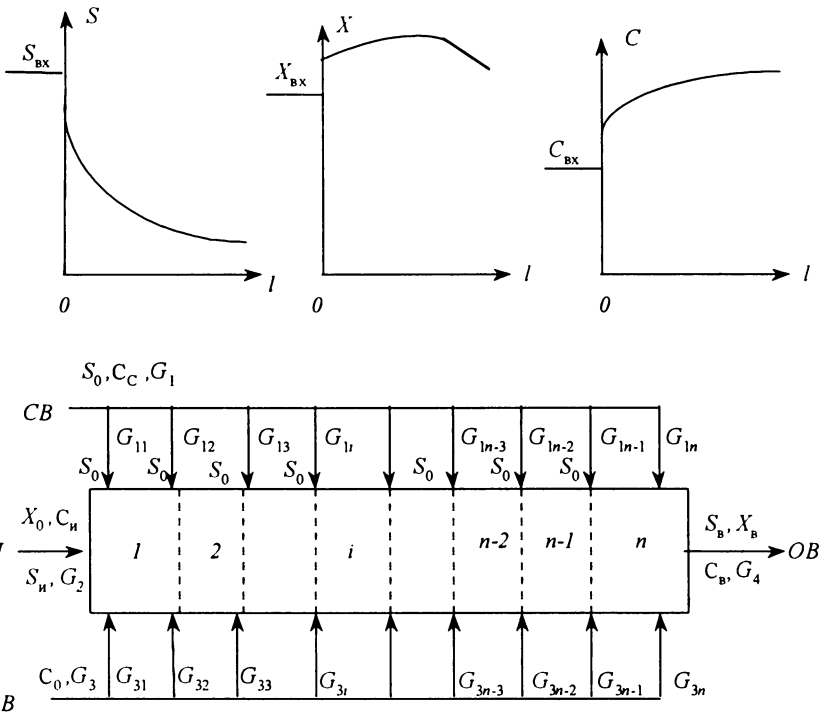


Рис 4 8 Изменение концентрации субстрата,активного ила и кислорода по длине аэротенка

Рис 4 9 Рассредоточенная подача сточной воды (обозначения см рис 4 5)

Модель аэротенка для условий рассредоточенной подачи сточной воды. На рис 4.9 представлена структура потоков при рассредоточенной подаче сточной воды (СВ) и сосредоточенной подаче активного ила (АИ) с сосредоточенным выводом очищенной жидкости (ОВ), что соответствует рис 4 5*в*

Линейная скорость *u* в аэротенке изменяется в каждой точке ввода сточной воды дискретно Помимо этого каждая точка ввода вносит в систему дополнительные возмущения, которые проявляются в изменении концентрации субстрата, активного ила и кислорода за счет разбавления Пусть аэротенк состоит из *n* ячеек, где *n* – число точек ввода сточной воды Тогда длина каждой ячейки $l = L/n$ Наиболее часты случаи, когда величина *l* соизмерима с шириной *B* и высотой *H* аэротенка При достаточно интенсивном перемешивании (такая схема применяется обычно при больших концентрациях поступающих загрязнений и требует интенсивного перемешивания) можно допустить, что гидродина-

мическая обстановка в каждой ячейке соответствует режиму идеального смешения Обмен потоков между ячейками осуществляется как за счет линейной скорости потока, так и за счет продольного перемешивания

Рассмотрим принцип работы такой схемы В первую ячейку поступает сточная вода G_{11} с концентрацией S_0, которая разбавляется активным илом G_2 с концентрацией $S_и$ и очищенной жидкостью $D \cdot F/l$ (величина обратного потока с концентрацией S_2, поступающая из второй ячейки) Одновременно из первой ячейки очищенная жидкость в количестве $Q_1 = G_2 + G_{11}$ и $g = F \cdot D/l$ с концентрацией S_1 переходит во вторую ячейку

Рассуждая аналогично для i-й ячейки, можно показать, что с распределительного канала в нее поступают сточная вода G_{1i} с концентрацией S_0, поток очищенной жидкости из $(i-1)$-й ячейки $Q_{i-1} = G_2 + \sum_{j=1}^{i-1} G_{1j}$ с концентрацией S_{i-1} и поток g с $(i+1)$-й ячейки с концентрацией S_{i+1} В свою очередь из i-й ячейки в соседние переходят потоки $Q_i = G_2 + \sum_{j=1}^{i} G_j$ и $2g$ с концентрацией S_i Вместе с тем концентрация загрязнений в каждой ячейке будет уменьшаться за счет окисления субстрата микроорганизмами Исходя из этого материальный баланс по субстрату для аэротенка (см рис 4 9) будет иметь вид

$$G_2 S_и + G_{11} S_0 - Q_1 S_1 + DF \frac{S_2 - S_1}{l} - \nu_1 W_1(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

.....

$$Q_{i+1} S_{i+1} + G_{1i} S_0 - Q_i S_i + DF \frac{S_{i+1} - 2S_i + S_{i-1}}{l} - \nu_i W_1(S_i, X_i, C_i) = 0, \quad (4\,17)$$

.....

$$Q_{n-1} S_{n-1} + G_{1n} S_0 - Q_n S_n + DF \frac{S_{n-1} - S_n}{l} - \nu_n W_1(S_n, X_n, C_n) = 0,$$

где $Q_i = G_2 + \sum_{j=1}^{i} G_j$, $j = 1,2,3, \ldots, n$

Материальный баланс по активному илу для аэротенка будет отличаться от уравнений (4 17), характеризующих материальный баланс для субстрата Это отличие объясняется различным характером ввода сточной воды (рассредоточенно) и активного ила (сосредоточенно)

$$G_2X_0 - Q_1X_1 + DF\frac{X_2 - X_1}{l} + \nu_1 W_2(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

.....

$$Q_{i-1}X_{i-1} - Q_iX_i + DF\frac{X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}}{l} + \nu_i W_2(S_i, X_i, C_i) = 0, \qquad (4\ 18)$$

.....

$$Q_{n-1}X_{n-1} - Q_nX_n + DF\frac{X_{n-1} - X_n}{l} + \nu_n W_2(S_n, X_n, C_n) = 0,$$

Материальный баланс по кислороду запишем, учитывая рассредоточенное распределение воздуха на аэрацию по всей длине аэротенка и наличие растворенного кислорода в поступающей сточной воде и активном иле

$$G_2C_и + G_{11}C_C + G_{31}KC_0 - Q_1C_1 + DF\frac{C_2 - C_1}{l} - \nu_1 W_3(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

.....

$$Q_{i-1}C_{i-1} + G_{1i}C_C + G_{3i}KC_0 - Q_iC_i + DF\frac{C_{i-1} - 2C_i + C_{i+1}}{l} - \nu_i W_3(S_i, X_i, C_i) = 0,$$

.....

$$Q_{n-1}C_{n-1} + G_{1n}C_C + G_{3n}KC_0 - Q_nS_n + DF\frac{C_{n-1} - C_n}{l} - \nu_n W_3(S_n, X_n, C_n) = 0, \qquad (4\ 19)$$

где K – коэффициент поглощения воздуха жидкостью в аэротенке

Объединяя уравнения (4 17) – (4 19), получим математическую модель процесса биохимической очистки сточных вод с дискретно рассредоточенной подачей сточной воды и сосредоточенной подачей активного ила для аэротенков с барботажной аэрацией

$$G_2S_и + G_{11}S_0 - Q_1S_1 + DF\frac{S_2 - S_1}{l} - \nu_1 W_1(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

.....

$$Q_{i-1}S_{i-1} + G_{1i}S_0 - Q_iS_i + DF\frac{S_{i-1} - 2S_i + S_{i+1}}{l} - \nu_i W_1(S_i, X_i, C_i) = 0,$$

.....

$$Q_{n-1}S_{n-1} + G_{1n}S_0 - Q_nS_n + DF\frac{S_{n-1} - S_n}{l} + \nu_n W_1(S_n, X_n, C_n) = 0,$$

.....

$$G_2X_0 - Q_1X_1 + DF\frac{X_2 - X_1}{l} + \nu_1 W_2(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

.....

$$Q_{i-1}X_{i-1} - Q_iX_i + DF\frac{X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}}{l} + \nu_i W_2(S_i, X_i, C_i) = 0,$$

.....

$$Q_{n-1}X_{n-1} - Q_nX_n + DF\frac{X_{n-1} - X_n}{l} + \nu_n W_2(S_n, X_n, C_n) = 0,$$

.....

$$G_2C_{\text{И}} + G_{11}C_{\text{С}} + G_{31}KC_0 - Q_1C_1 + DF\frac{C_2 - C_1}{l} - \nu_1 W_3(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

.....

$$Q_{i-1}C_{i-1} + G_{1i}C_{\text{С}} + G_{3i}KC_0 - Q_iC_i + DF\frac{C_{i-1} - 2C_i + C_{i+1}}{l} - \nu_i W_3(S_i, X_i, C_i) = 0,$$

.....

$$Q_{n-1}C_{n-1} + G_{1n}C_{\text{С}} + G_{3n}KC_0 - Q_nC_n + DF\frac{C_{n-1} - C_n}{l} - \nu_n W_3(S_n, X_n, C_n) = 0. \quad (4\ 20)$$

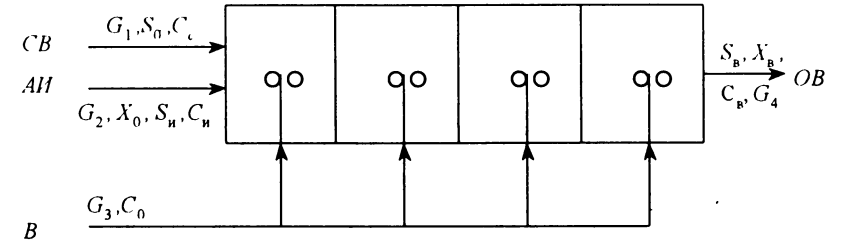
где $Q_i = G_2 + \sum_{j=1}^{i} G_j$, $i = 1,2,3, \ldots n$

Модель аэротенка с пневмомеханической аэрацией. Применение механических аэраторов обеспечивает относительно быстрое выравнивание концентрации поступающих сточных вод по всему объему сооружения, что особенно важно при очистке сточных вод предприятий, для которых характерно наличие залповых сбросов с большой концентрацией загрязнений

Пневмомеханические аэраторы устанавливаются в обычных аэротенках коридорного типа равномерно по длине (рис 4 10) Работу аэротенка такой конструкции можно рассматривать как работу аэротенка, состоящего из *n* зон (по числу аэраторов), перемешивание в каждой из зон является результатом турбулентной диффузии, а обмен между зонами – результатом циркуляции

Для вывода уравнения модели составим материальный баланс, для *i*-й ячейки, как показано на рис 4 11

Составим материальный баланс по субстрату, активному илу и кислороду



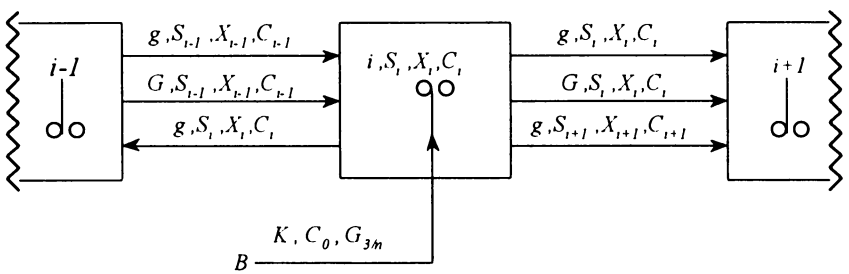


Рис 4 10 Распределение пневмомеханических аэраторов по длине аэротенка
(обозначения см рис 4 5)

Рис 4 11 К выводу уравнения ячеечной модели с обратными потоками
i – номер ячейки (i = 1,2,3, , n); G, g - расход CB, обусловленный основным потоком, сбросом с лопастных мешалок,соответственно, м^3/ ч

$$G(S_{вх} - S_1) + g(S_2 - S_1) - \nu_1 W_1(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

… … …

$$G(S_{i-1} - S_i) + g(S_{i-1} - S_{i+1}) - 2gS_i - \nu_i W_1(S_i, X_i, C_i) = 0,$$

… … …

$$G(S_{n-1} - S_n) + g(S_{n-1} - S_n) - \nu_n W_1(S_n, X_n, C_n) = 0,$$

… … …

$$G(X_{вх} - X_1) + g(X_2 - X_1) + \nu_1 W_2(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

… … …

$$G(X_{i-1} - X_i) + g(X_{i-1} - X_{i-1}) - 2gX_i + \nu_i W_2(S_i, X_i, C_i) = 0$$

$$G(X_{n-1} - X_n) + g(X_{n-1} - X_n) + \nu_n W_2(S_n, X_n, C_n) = 0,$$

… … …

$$G(C_{вх} - C_1) + KC_0 G_{31} - \nu_1 W_3(S_1, X_1, C_1) = 0,$$

… … …

$$G(C_{i-1}-C_i)+KC_0G_{3i}-\nu_iW_3(S_i,X_i,C_i)=0,$$

.....

$$G(C_{n-1}-C_n)+g(C_{n-1}-C_n)+KC_0G_{3n}-\nu_nW_3(S_n,X_n,C_n)=0,\quad(4.21$$

где i = 1,2,3, , n, $S_{вх}$, $X_{вх}$, $C_{вх}$ – определяются так же, как в (4 14)

Частным случаем модели (4 21) является модель для аэротенков с пневмомеханическими аэраторами без обратных потоков (4 22)

$$G(S_{вх}-S_1)-\nu_1W_1(S_1,X_1,C_1)=0,$$

.....

$$G(S_{i-1}-S_i)-\nu_iW_1(S_i,X_i,C_i)=0,$$

.....

$$G(S_{n-1}-S_n)-\nu_nW_1(S_n,X_n,C_n)=0,$$

.....

$$G(X_{вх}-X_1)+\nu_1W_2(S_1,X_1,C_1)=0,$$

.....

$$G(X_{i-1}-X_i)+\nu_iW_2(S_i,X_i,C_i)=0,$$

.....

$$G(X_{n-1}-X_n)+\nu_nW_2(S_n,X_n,C_n)=0,$$

.....

$$G(C_{вх}-C_1)+KC_0G_{31}-\nu_1W_3(S_1,X_1,C_1)=0,\qquad(4\ 22)$$

.....

$$G(C_{i-1}-C_i)+KC_0G_{3i}-\nu_iW_3(S_i,X_i,C_i)=0,$$

.....

$$G(C_{n-1}-C_n)+KC_0G_{3n}-\nu_nW_3(S_n,X_n,C_n)=0,$$

i = 1,2,3, n

Таким образом, мы получили математические модели (4 13), (4 15), (4 20), (4 22) для различных способов аэрации и организации потоков в аэротенках При решении конкретных задач с использованием разработанных уравнений моделей необходимо иметь данные по кинетике процесса [$W_i(S_i, X_i, C_i)$, i = 1,2,3], структуре потоков (D, g) и количеству растворенного кислорода в жидкой фазе (KC_0G_{3i})

4.1.4. Кинетика процесса изъятия субстрата микроорганизмами

Скорость процесса биологического окисления органических веществ в системах с активным илом контролируется стадией диффузии кислорода и субстрата, а не ферментативной активностью микрофлоры Однако, как было отмечено раннее, в состав микрофауны активного ила при работе аэротенков входит до 60 видов организмов – в основном это простейшие, коловратки, в меньшем количестве черви и т д Поэтому биосистему активного ила представляют несколькими трофическими уровнями первый уровень – это в основном гетеротрофные бактерии, второй уровень – инфузории и коловратки, питающиеся бактериями, третий – хищные инфузории

Интенсивность потребления кислорода этими микроорганизмами различна Так, мелкие коловратки средним весом 10^{-3} - 10^{-4} мг потребляют 6,6 мг O_2/г·ч, а крупные коловратки (весом $2 \cdot 10^{-2}$мг) – 1,3 мг O_2/г·ч В то же время одна инфузория за один час потребляет до 30 тысяч бактерий Один миллиграмм бактерий (в пересчете на сухой вес) в период логарифмического роста потребляет до 1000 мкл кислорода Следовательно, потребление кислорода связано не только с процессом окисления субстрата микроорганизмами, но и с процессами потребления бактерий простейшими Очевидно поэтому, что математическая модель должна учитывать роль микроорганизмов активного ила в процессе очистки Кинетика роста микроорганизмов, потребление загрязнений и растворенного кислорода взаимосвязаны, и уравнения, отражающие эту взаимосвязь, записываются в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{dS_i}{dt} &= -W_i(S_i, X_1, X_2, \ldots, X_m, C), \\ \frac{dX_j}{dt} &= \varphi_j(S_1, S_2, \ldots, S_n, X_1, X_2, \ldots, X_m, C), \\ \frac{dC}{dt} &= -f(S_1, S_2, \ldots, S_n, X_1, X_2, \ldots, X_m, C), \end{aligned} \qquad (4\ 23)$$

где S_i – концентрация i-й компоненты загрязнений (i = 1,2,3, . , n); X_j – концентрация j-го вида микроорганизмов (j = 1,2,3, . , m), C – концентрация растворенного в жидкости кислорода

Система (4 23) описывает изъятие n компонентов органических веществ в процессе роста m видов микроорганизмов При этом происходит потребление растворенного кислорода и одновременно идет процесс реаэрации

Для случая, когда процесс биохимического окисления в широком интервале изменений концентрации растворенного кислорода постоянен, система уравнений (4 23) будет иметь вид

$$\frac{dS_i}{dt} = -W_i(S_i; X_1, X_2, \ldots, X_n),$$
$$\frac{dX_j}{dt} = \varphi_j(S_1, S_2, \ldots, S_n, X_1, X_2, \ldots, X_m) \qquad (4\ 24)$$

Поскольку количественный учет микроорганизмов затруднен, обычно их количество определяется концентрацией биомассы Когда суммарная концентрация S компонентов загрязнений измеряется в эквивалентах по БПК, система уравнений (4.24) имеет вид

$$\frac{dS}{dt} = -W(S, X),$$
$$\frac{dX}{dt} = \varphi(S, X). \qquad (4\ 25)$$

Другое направление разработки математического описания кинетики очистки сточных вод активным илом основано, как было отмечено выше, на предположении пропорциональности масс потребленного кислорода и окисленного субстрата. Для этого случая система уравнений (4 23) принимает вид:

$$\frac{dS_i}{dt} = -W_i(S_i, C);$$
$$\frac{dC}{dt} = -f(S_1, S_2, \ldots, S_n, C) \qquad (4\ 26)$$

Таким образом, уравнение (4.25) описывает кинетику окисления субстрата активным илом с учетом концентрации микроорганизмов, а уравнение (4 26) – кинетику изъятия загрязнений микроорганизмами с учетом кислорода Проанализируем эти уравнения, чтобы определить, какое из них наиболее полно и точно отражает реальные процессы очистки сточной воды илом

По современным представлениям процесс очистки сточных вод складывается из процессов массопередачи органического вещества из жидкости к поверхности бактериальной клетки, диффузии вещества внутрь клетки и последующего превращения его в циклах конструктивного и энергетического обмена. Ни одно из известных уравнений, описывающих эти закономерности, не является универсальным и не может быть применено в условиях изменения параметров процесса в широком диапазоне, поскольку константы кинетических уравнений, описывающих процесс биохимической очистки сточных вод, различных по своему составу и концентрации, должны быть различными. Рассмотрим с этой позиции модели (4 25), (4 26) и оценим их возможности

Расчет процесса биохимической очистки сточных вод от органических загрязнений основывается на кинетических зависимостях роста микроорганизмов активного ила (биомассы) и утилизации ими субстрата Выделяют два основных подхода к выбору моделей кинетики в первом случае процесс утилизации субстрата описывается уравнением формальной химической кинетики нулевого или n-го порядков, во втором случае исполь-

зуются уравнения ферментативной кинетики

Наибольшее распространение получили кинетические модели на основе схем ферментативных реакций.

модель Моно

$$\mu(S) = \mu_m \frac{S}{K_1 + S},$$

где K_1 – концентрация субстрата при $\mu = \mu_m/2$; μ_m – максимальная удельная скорость роста, S – концентрация субстрата (БПК$_5$), г O_2/л,

модель Герберта

$$\mu(S) = \mu_m \frac{S}{K_1 + S} - K_2,$$

где K_1 – константа насыщения, K_2 – константа скорости отмирания клеток

Более детально процесс роста микроорганизмов активного ила, утилизации им органических загрязнений и отмирания клеток описывает модель Герберта Конкретные значения констант насыщения (K_1) и удельной скорости роста ила (μ) определяются для сточных вод каждого биохимического производства.

Теоретическое и экспериментальное изучение процесса очистки загрязненных вод в биофильтрах показывает, что на эффективность их работы существенно влияют как механизм бактериального окисления, так и физические процессы массопередачи Поскольку поступающие на биофильтр сточные воды содержат, как правило, множество различных органических веществ, биопленка, растущая на таком субстрате, имеет сложный многовидовой состав Процесс окисления растворенного органического вещества активного ила представляет собой гетерогенную каталитическую реакцию Предложен ряд моделей, называемых диффузионными, для описания окисления отдельных субстратов биопленкой В ходе процесса очистки реагент контактирует сначала с поверхностью частицы и далее переносится внутрь частицы, к собственно каталитическому центру, которым являются микроорганизмы, входящие в состав частицы активного ила

Для диффузионной модели можно сделать следующие допущения

1) частица ила сферически симметрична,

2) концентрация субстрата на поверхности частицы равна концентрации субстрата в растворе (случай идеального перемешивания),

3) отдельные микроорганизмы распределены внутри хлопьев равномерно,

4) бактерии активного ила потребляют субстрат по закону "все или ничего"

$$q(S) = \begin{cases} \mu_m / Y, & \text{если} \quad S > 0, \\ 0, & \text{если} \quad S = 0, \end{cases}$$

где Y – коэффициент, отражающий массу синтезированных микроорганизмов из единицы массы усвоенного субстрата, $q(S)$ – скорость потребления субстрата единицей биомассы.

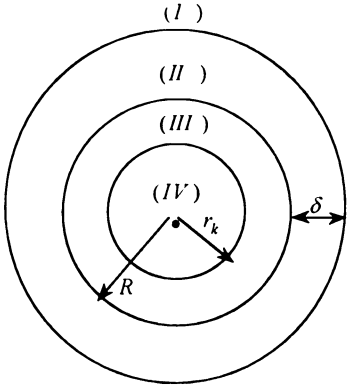


Рис 4 12 Распределение субстрата внутри и снаружи частицы ила (пояснения см в тексте)

5) среднее расстояние между центрами частиц ила намного превышает размеры частиц,

6) скорость установления стационарного распределения концентрации субстрата внутри частицы ила намного больше скорости окисления субстрата

Решение задачи может быть корректным, если воспользоваться кусочно-линейной аппроксимацией зависимости Моно для микроорганизмов в частице ила

Выделяют четыре области в распределении субстрата внутри и снаружи частицы ила (рис 4 12)

I – область с постоянной концентрацией субстрата (δ – толщина биологической пленки)

$$r > R + \delta, \quad S = S_p,$$

II – область слоя

$$R \le r \le R + \delta, \quad S_n \le S \le S_p,$$

где происходит быстрое изменение концентрации субстрата в непосредственной близости от поверхности частицы,

III – область, в которой субстрат потребляется с максимальной скоростью

$$r_K \le r \le R, \quad S_K \le S \le S_n,$$

IV – область, в которой скорость потребления субстрата пропорциональна его концентрации

$$0 \le r \le r_K; \quad 0 \le S \le S_K.$$

Толщина диффузионного слоя зависит от интенсивности перемешивания среды при идеальном перемешивании

Для областей III и IV уравнения, описывающие процесс стационарной диффузии, имеют вид

$$\Delta_r S = (d_c \mu_m / Y D_M S_n) S, \quad r_K \le r \le R,$$

$$\Delta_r S = (d_c \mu_m / Y D_M S_K) S, \quad 0 \le r \le r_K,$$

где $\Delta_r = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \frac{d}{dr})$ – оператор Лапласа в сферической системе координат, D_M – коэффициент молекулярной диффузии вещества внутри хлопьев; d_c – плотность сухой биомассы в частице ила.

При этом должны выполняться следующие граничные условия

$$r = R \to S = S_p, \qquad r = r_0 \begin{cases} S = 0 \\ dS/dr = 0, \end{cases}$$

где r – расстояние от центра частицы, R – радиус частицы, r_0 – расстояние от центра частицы, при котором концентрация субстрата становится равной нулю

Таким образом, при $r = r_0$ исчезает и поток частиц

Уравнение кинетики, в соответствии с моделью Герберта, имеет вид

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha\mu_m \frac{S \cdot X}{K_1 + S},$$
$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{S \cdot X}{K_1 + S} - K_2 X \qquad (4\ 27)$$

Для процесса окисления субстрата микроорганизмами, с учетом концентрации органических загрязнений в сточных водах и концентрации растворенного кислорода в аэрационном сооружении, кинетические уравнения имеют вид

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{\gamma}\beta C^* \frac{C^*}{(C^* - C)} \frac{S^2}{S_0^2}, \frac{dC}{dt} = -\beta C^* \frac{C^*}{(C^* - C)} \frac{S}{S_0} + \beta(C^* - C), \qquad (4\ 28)$$

где β – объемный коэффициент массопередачи, $ч^{-1}$, C^* – концентрация насыщения кислорода в жидкости,$г/м^3$,γ – энергетический коэффициент,кг/кг·с,α – константа, г БПК/г ила

В работе В Вавилина приводятся следующие значения констант модели Герберта, полученные при очистке сточной воды до уровня S_k - 10 $г/м^3$ с концентрацией S_0 = 1000 г БПК/$м^3$ и средней концентрации ила в аэротенке X = 2000 $г/м^3$

μ_m = 0,11 $ч^{-1}$; α = 2,0 г БПК/г ила; K_1 = 100 г БПК/$м^3$, K_2 = 0,005 $ч^{-1}$

В то же время Мозером при исследовании параметров этой же кинетической модели получены другие результаты

μ_m = 0,09 $ч^{-1}$, α = 1,67 г БПК/г ила, K_1 = 400 г БПК/$м^3$, K_2 = 0,02 $ч^{-1}$

Как видим, значения коэффициентов α, μ, K_1 и K_2 существенно различаются К сожалению, в обеих работах не указано, применительно к каким сточным водам производился расчет Так, например, коэффициент α, который характеризует прямую зависимость между потреблением субстрата ($S_0 - S$) и ростом бактерий

$$\alpha = (S_0 - S)/(X - X_0),$$

для случая очистки бытовых сточных вод будет значительно отличаться от значений для случая, когда описывается процесс очистки производственных сточных вод, особенно для целлюлозно-бумажной промышленно-

сти Это различие объясняется прежде всего тем, что в состав сточных вод целлюлозно-бумажных производств, в отличие от бытовых стоков, входят трудноокисляемые вещества, которые разлагаются лишь определенными видами бактерий или микробов Скорость роста и размножения этих микроорганизмов в свою очередь различна Поэтому α не может рассматриваться как константа, этот коэффициент следует определять для определенного вида субстрата и конкретного вида микроорганизмов

В результате расчета и утилизации субстрата микробной массой по модели кинетики Герберта (4 27) для случая, когда концентрация субстрата S = 240 г/м^3 по БПК$_5$ и концентрация активного ила X = 2200 г/м^3, были получены количественные характеристики, отражающие влияние констант α, μ, K_1 и K_2 на процесс очистки сточных вод

Экспериментальные исследования показали, что уменьшение α сопровождается замедлением скорости изъятия субстрата и увеличением скорости роста биомассы При значении α = 1,5 наблюдается быстрое изъятие органических загрязнений. Уже через 1,4 ч концентрация субстрата по БПК снизилась от 240 до 10 г/м^3, а при α = 0,9 такая же глубина очистки достигается лишь в конце третьего часа. При α = 0,5 только через 1,4 ч после начала реакции концентрация загрязнений понижается до 128 г/м^3 против 90 г/м^3 при α = 0,9 и 10 г/м^3 при α = 1,5.

Увеличение скорости роста биомассы при α = 1,5 прекращается после 1,4 ч, так как к этому времени почти вся основная масса субстрата потреблена, при α = 0,7 рост биомассы прекращается лишь в конце третьего часа В случае же α = 0,5 рост биомассы продолжается и в конце третьего часа В процессе биохимической очистки сточных вод активный ил играет основную роль

Аналогичный расчет и анализ был проведен по всем остальным константам кинетического уравнения Герберта Анализ показал, что при соответствующем подборе значений α, μ, K_1 и K_2 кинетика по модели Герберта может успешно применяться для описания процесса биохимической очистки сточных вод разнообразного состава При этом предполагается, что концентрация кислорода в очищенной воде находится в пределах нормы Подобный анализ был проведен и для кинетической модели (4 28), основанной на предположении о зависимости процесса биохимической очистки сточных вод от концентрации кислорода Результаты расчета показали, что количество воздуха, подаваемого для обеспечения достаточной интенсивности перемешивания и распределения активного ила в аэротенке, является вполне достаточным для процесса окисления субстрата микроорганизмами. Поэтому нет необходимости увеличивать расход воздуха и учитывать количество кислорода в расчетных уравнениях

4.2. Математическая модель процесса очистки сточных вод биофильтрами

Способность биофильтров к очистке в большой мере зависит от различных факторов, связанных с техническими характеристиками насадок, технологическими показателями и условиями работы

К технологическим характеристикам насадки, оказывающей непосредственное влияние на эффект очистки, относятся удельная поверхность и порозность насадки, конфигурация элементов насадки и соответствующие условия для ее смачивания

Многие специалисты считают, что создание математических моделей, описывающих действие биофильтров, – задача очень трудная, а описанные в литературе модели еще не дают достаточно точных результатов В последние годы более высокую значимость получают математические модели, основанные на кинетике бактериального роста, а также на массообменных процессах, протекающих в биофильтрах

Для вывода математической модели, основанной на кинетике бактериального роста, делается предположение, что каждое горизонтальное поперечное сечение представляет собой псевдогомогенный биологический реактор При этом принимается, что скорость реакций, протекающих в биологической пленке, выражается через скорость утилизации субстрата r_{su} в рассматриваемом поперечном сечении

Материальный баланс субстрата для элемента длиной dZ можно выразить следующим образом.

$$QS - Q(S + dS) + r_{su}V_b = 0$$

или

$$-QdS + r_{su}V_b = 0, \qquad (4\ 29)$$

где Q – количество сточных вод, поступающих в биофильтр, м^3/ч, S – концентрация субстрата в рассматриваемом сечении, г/м^3, dS — изменение концентрации субстрата, г/м^3, $V_б$ – объем биомассы, м^3

Скорость утилизации субстрата r_{su} может быть выражена уравнением

$$r_{su} = -\mu_m XS / Y(K_1 + S) \qquad (4\ 30)$$

Объем активной биомассы, в которой протекают биохимические реакции, составит

$$V_b = \delta F_S AdZ, \qquad (4\ 31)$$

где F_S – удельная поверхность насадки м^2/м^3, А – площадь поперечного сечения, м^2

Подставив (4 30) и (4 31) в балансовое уравнение (4 29), получаем

$$QdS + \left[\mu_m XS / Y(K_1 + S)\right]\delta F_S AdZ = 0 \qquad (4\ 32)$$

После интегрирования уравнения (4 32) при постоянной толщине пленки (δ) концентрация субстрата изменяется от S_l при $Z = 0$ до S_l при $Z = Z_l$; в результате получаем

$$Q(S_l - S_t) + K_1 Q \ln(S_l / S_t) + (\mu_m X\delta F_S AZ_l / Y) = 0,$$

где S_t, S_l – концентрация субстрата перед входом и на выходе биофильтра

Приняв $P = \mu_m \delta X/Y$, после преобразования получаем

$$\ln(S_l / S_i) = \left[(S_i - S_l)/K_1\right] - (PF_S AZ_l / QK_1)$$

Параметры P и K_1 можно определить экспериментально, они зависят от гидравлической нагрузки биофильтра

Если принять, что скорость биохимических процессов выражается через массообмен субстрата на границе раздела слоев жидкость-биомасса, материальный баланс в элементарном объеме фильтровальной насадки можно выразить уравнением

$$QdS = -K_L F_S A(S - S_f)dZ, \qquad (4\ 33)$$

где K_L – коэффициент массообмена; S_f – концентрация субстрата на границе раздела между жидкостью и биопленкой

Так как S_f приближается к нулю, после интегрирования уравнения (4 33) от S_i до S_l получаем

$$\ln(S_l / S_i) = -K_L F_S Z_l / q_S, \qquad (4\ 34)$$

где $q_S = Q/A$ – гидравлическая нагрузка биофильтра

Для турбулентного потока

$$K_L = K_0 q_S^m \qquad (4\ 35)$$

показатель степени m находится в пределах 0,3-0,5

После подстановки (4.35) в (4.34) получим

$$S_l / S_i = \exp(-K_0 F_S Z_l / q_S^m) \ ,$$

K_0 и m определяют экспериментальным путем.

4.3. Математическая модель биохимического реактора аэробной ферментации

Оценить влияние различных уровней взаимодействия можно лишь приближенно, поскольку нет четкого разграничения явлений, происходящих на микроуровне (в клетках, в микробных популяциях) и на макроуровне (процессы массо- и теплопередачи, зависящие, в свою очередь, от гидродинамики структуры потоков в биореакторе) Следовательно, и математические модели биохимических реакторов – достаточно больших систем, могут быть лишь приближенными

Математическая модель биохимического реактора включает в себя описание совокупности процессов, протекающих на микроуровне и определяемых микрокинетикой биосинтеза, а также описание процессов, отно-

сящихся к макроуровню и определяемых гидродинамической тепло- и массообменной обстановкой в аппарате Так, условия диспергирования и дробления фаз, характер и структура потоков, уровень сегрегации среды, а также условия тепло- и массообмена могут быть детально рассмотрены только применительно к аппаратуре определенного типа и конструкции, иными словами, конструктивные и геометрические особенности биохимического реактора определяют конкретный вид модели, адекватной происходящим в реакторе процессам и явлениям В свою очередь, анализ и оптимизация процесса по его математической модели позволяют обоснованно рекомендовать для того или иного микробиологического процесса предпочтительный тип биохимического реактора и его основные конструктивные параметры

Математическое моделирование биореакторов сводится к формализации рассматриваемой сложной системы и заключается в установлении связи между выходными параметрами системы, параметрами состояния и входными возмущающими и управляющими переменными Анализ структуры системы должен дать четкое представление о характеристиках многофазной системы, в том числе о таких, как характер распределения элементов фаз по времени пребывания в аппарате, вид распределения включений дисперсных фаз по размерам, распределение микробных клеток по возрасту и времени их жизни в реакторе, эффекты механического взаимодействия между фазами, вязкость, плотность, поверхностное натяжение и другие Достаточно информативная математическая модель биореактора становится основой для оптимального проектирования аппаратов, выбора технологического режима в нем, оптимизации и автоматического управления микробиологическим процессом

Процесс *аэробной ферментации* микроорганизмов основывается на положении о том, что газообразный источник питания (воздух) потребляется в растворенном виде, вследствие чего необходим этап транспорта кислорода из газовой фазы в жидкость, обычно именно эта стадия в большинстве случаев является лимитирующей стадией всего процесса Наличие в ферментационной среде клеточных агломератов и глобул приводит к снижению скорости транспорта кислорода к клеткам за счет сопротивления перехода на границе жидкость–клетка (агломерат, глобула)

Система уравнений модели непрерывной аэробной ферментации в биохимическом реакторе, учитывающая потребление кислорода микроорганизмами с идеальным перемешиванием по жидкой фазе, будет иметь следующий вид (условные обозначения к уравнениям (4 36)–(4 39) см в разделе 4 1)

$$\begin{aligned} &\nu X_0 + \mu(S, X, C_l)XV = \nu X + VdX/dt, \\ &\nu S_0 - \alpha_S \mu(S, X, C_L)XV = \nu S + VdS/dt, \\ &\nu C_L^n - K_L a(C_L^* - C_L)V - \alpha_{o_2} \mu(S, X, C_L)XV = \nu C_L^\kappa + VdC_L/dt, \end{aligned} \qquad (4\ 36)$$

где ν – объемная скорость, $K_L a$ – объемный коэффициент массопередачи по кислороду, α_S, α_{o_2} – стехиометрические коэффициенты по субстрату и кислороду, C_L^n, C_L^κ, C_L^* – концентрация кислорода начальная, конечная и равновесная

Для установившегося режима работы реактора используем кинетическую модель, отражающую зависимость удельной скорости роста микроорганизмов от концентрации кислорода в среде, выраженную в модели Михаэлиса–Ментен При этом получим

$$dX/dt = 0 = \left[\mu_m C_L/(K_{o_2} + C_L)\right]X - DX,$$
$$dS/dt = 0 = D(S_0 - S) - \alpha_S\left[\mu_m C_L/(K_{o_2} + C_L)\right]X,$$
$$dC_L/dt = 0 = K_L a(C_L^* - C_L) - \alpha_{o_2}\left[\mu_m C_L/(K_{o_2} + C_L)\right]X - D(C_L^{\kappa} - C_L^{\mu}), \quad (4\ 37)$$

(здесь D скорость разбавления)

Модель описывает процесс ферментации аэробной культуры микроорганизмов в реакторе полного смешения, когда концентрация растворенного в среде кислорода влияет на скорость роста клеток

При культивировании микроорганизмов отмечается высокая скорость сорбции кислорода, которая может превышать критическую для данной культуры ($C_L > C_{крит}$) В этих условиях удельная скорость роста микроорганизмов не будет зависеть от концентрации кислорода в среде, и кинетика роста определится соотношением $\mu = \mu(S)$ Используя в качестве кинетической зависимости модель Моно–Иерусалимского, получим следующую систему уравнений

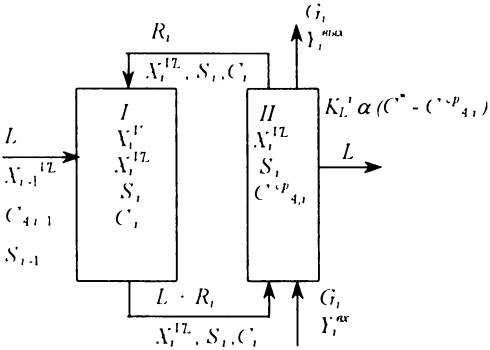
$$dC_L/dt = K_L a(C_L^* - C_L) - \alpha_{o_2}\mu_m\left[S/(K_1 + S)\right]\left[K_{pS}/(K_{pS} + S_0 - S)\right]X - DC_L,$$
$$dX/dt = \mu_m\left[S/(K_1 + S)\right]\left[K_{pS}/(K_{pS} + S_0 - S)\right]X - DX,$$
$$dS/dt = D(S_0 - S) - \alpha_s\mu_m\left[S/(K_1 + S)\right]\left[K_{pS}/(K_{pS} + S_0 - S)\right]X, \quad (4\ 38)$$

где K_{pS} – кинетический коэффициент по субстрату, определяемый экспериментально

Расчет по данной модели позволяет установить характер изменения основных технологических параметров процесса при различных режимах ферментации, а также влияние массообменных характеристик биохимического реактора на его технологические показатели

Для моделирования работы биореактора была разработана математическая модель процесса очистки сточных вод Для анализа и раскрытия закономерностей взаимовлияющих факторов были применены основы системного подхода Весь биореактор был декомпозирован на отдельные модули исходя из технологических и конструктивных соображений Каждый модуль рассматривался при этом как самостоятельный биологический реактор, где протекают процессы биологической очистки

Первоначально математическая модель была разработана для описания работы только одного модуля (ячейки) аппарата Отдельный модуль представляет собой аппарат, состоящий из двух частей (зон), разделенных твердой перегородкой В одной зоне снизу подается только воздух



Это так называемая эрлифтная зона, служащая лишь для аэрации реакционной среды В другой зоне происходит процесс очистки как таковой С помощью микроорганизмов проводится утилизация субстрата, при этом концентрация загрязнителя уменьшается Эта зона называется реакционной

Рис 4 13 Распределение потоков и вещества в *i*-й секции биореактора (пояснения см в тексте уравнения (4 39))

Для вывода модели были сделаны некоторые допущения

1 Толщина биопленки на носителе всегда остается постоянной

2 Частицы носителя вместе с прикрепленной на них биомассой принимались за плавающие флоккулы, и концентрация микроорганизмов в растворе поддерживалась за счет фиксированной биомассы

3 Процесс утилизации субстрата рассматривали как упрощенную диффузионную модель

4 Взаимодействие между микроорганизмами, растворенным органическим веществом и кислородом в растворе осуществляется согласно стехиометрии процесса

5 Субстрат является идеально перемешанным по всему объему биореактора и по кислороду имеет кинетику нулевого порядка

6 Процессы биодеградации стоков, утилизации кислорода и накопления биомассы протекают в реакционной зоне

7 В аэрационной зоне осуществляется только массоперенос кислорода

Математическая модель разработана на основе декомпозиции одного модуля биореактора На рис 4 13 представлена структура потоков в *i*-й секции биореактора Как уже говорилось, отдельный модуль состоит из двух секций – реакционной (I) и эрлифтной (II) Математическая модель учитывает материальный баланс процесса по развитию микроорганизмов, утилизации субстрата и кислорода, а также массоперенос кислорода из газовой фазы в жидкую Она может быть записана в следующем виде

реакционная зона

$$R_i X_i^{IL} + L X_{i-1}^{IT} - (L + R_i) X_i^{IT} + V_i^R \{\mu_m [S_i/(K_1 + S_i)] - K_2\}(X_i^I + X_i^{II}) = 0,$$

$$L S_{i-1} + R_i S_i - (L + R_i) S \quad (1/\alpha_S) V_i^R \mu_m [S_i/(K_1 + S_i)](X_i^I + X_i^{IT}) = 0,$$

$$L C_{i-1} + R_i C_{i-} - (L + R_i)(C_i - (1/\alpha_{O_2}) V_i^R \mu_m [S_i/(K_1 + S_i)](X_i^I + X_i^{II}) = 0$$

эрлифтная зона

$$G_i Y_i^{\text{вх}} - G_i Y_i^{\text{вых}} - V_i^A K_L^i a(C^* - C_{A,i}^{\text{ср}}) = 0,$$

$$(L + R_i)C_i - R_i C_{A,i} - LC_{A,i}^{\text{ср}} + V_L^A K_L^i a(C^* - C_{A,i}^{\text{ср}}) = 0, \qquad (4\ 39)$$

где $i = 1, \ , N$ – число секций, $C_{A,i}^{\text{ср}}$ – концентрация кислорода в эрлифтной зоне, кг/м^3, X_{i-1}^{VL}, X_i^{VL} – концентрации свободных микроорганизмов в (i–1)-й и i-й секциях,кг/м^3,X_i^V – концентрация фиксированных микроорганизмов в i-й секции, кг/м^3, S_{i-1}, S_i – концентрации органических загрязнении в (i-1)-й и i-й секциях, кг/м3, $C_{A,i-1}$, $C_{A,i}$, C_i – концентрации растворенного кислорода в реакционной зоне в (i-1)-й и i-й секциях, кг/м3, L – расход сточной воды на входе и выходе, м3/ч; R_i – внутренний рециркуляционный поток, м3/ч, $K_l'a$ – объемный коэффициент массопередачи по кислороду в i-й секции, ч$^{-1}$; C^* – равновесная концентрация растворенного кислорода, кг/м3; $Yi^{\text{вх}}$,$Yi^{\text{вых}}$ – концентрация кислорода в газе на входе и выходе i-й секции, кг/м^3, G_i – расход воздуха в i-й секции, м^3/ч, V_i^R – объем жидкости реакционной зоны i-й секции, м^3; V_i^A – объем жидкости аэрационной (эрлифтиой) зоны i-й секции, м^3; μ_m – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов, ч$^{-1}$, K_1 – константа насыщения, кг/м^3, K_2 – скорость отмирания клеток, ч$^{-1}$

Первые три уравнения модели описывают скорость роста микроорганизмов, утилизацию субстрата и кислорода, которые осуществляются только в реакционной секции, вторые два – материальный баланс в аэрационной зоне

От большинства феноменологических моделей микробиологического синтеза нелинейные кинетические модели, используемые для оптимального проектирования биохимических реакторов, отличаются своей простотой Они предназначены для описания роста и размножения микроорганизмов на уровне популяции в конкретных условиях культивирования и поэтому учитывают влияние только основных изменяемых факторов и кинетики основных макрореакций на процесс биосинтеза. Предпочтительным при построении модели является выбор одно- или двухфакторных зависимостей удельной скорости роста, поскольку для многофакторных моделей методология расчета существенно усложняется.

Математическое описание динамики утилизации субстрата и накопления биомассы связано с параметрической и структурной идентификацией модели удельной скорости роста Нужно отметить, что удельная скорость роста является интенсивной характеристикой популяции культуры и зависит в основном от концентрации как лимитирующих субстратов, так и ингибирующих метаболитов, высоких концентраций самой биомассы, температуры и т д В зависимости от числа учитываемых факторов среды, влияющих на удельную скорость роста клеток, кинетические уравнения можно подразделить на две группы· однофакторные и многофакторные

В *однофакторных уравнениях* учитывается влияние на удельную скорость роста только одного фактора – окружающей среды, при этом предполагается, что остальные влияющие факторы поддерживаются на оптимальном уровне

Многофакторные кинетические модели можно сгруппировать в ката-

лог по числу используемых в них факторов, а также по характеру взаимосвязи факторов в кинетическом уравнении

Математическое описание кинетики биосинтеза основано на следующих допущениях

1) установившееся состояние в биологическом смысле характеризуется тем, что состав биомассы в целом остается постоянным во времени, несмотря на то, что имеет место рост индивидуальных организмов,
2) клетка представляет собой образование с функциями, постоянными во времени,
3) средние свойства клетки зависят от окружающей среды,
4) для биомассы используемой бактериальной культуры как целого распределения микроорганизмов и популяции по возрасту (а также по таким генетическим характеристикам, как способность к адаптации, выживаемость, подверженность мутациям, отношение к селекции и биологическая полноценность) является постоянным во времени

Согласно опубликованным результатам исследований, структура стартовой кинетики непрерывного процесса очистки сточных бытовых вод выбирается в соответствии с одной из двух моделей моделью Моно или моделью Герберта

На основе выбранной модели процесса очистки проводились расчеты с использованием обеих кинетических моделей роста микроорганизмов С

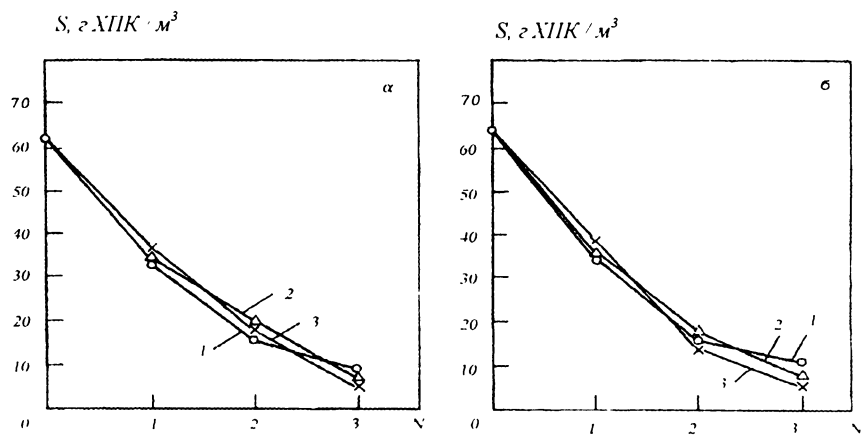


Рис 4 14 Результаты анализа двух конкурирующих моделей при разных начальных концентрациях загрязнителя

1 – экспериментальные данные, *2* – модель Герберта, *3* – модель Моно. $\Delta S = \sum_{i=1}^{3} (S_i^{эксп} - S_i^{расч})^2$.

	S_0	Модель Моно (ΔS)	Модель Герберта (ΔS)
а	61 0	5 94	5 21
б	64 0	6 46	5 03

помощью разработанной математической программы вычислялись концентрации на выходе каждого модуля биореактора при различных начальных концентрациях питательной среды

Материальный баланс по биомассе и субстрату имеет вид

для **модели Моно**

$$dX/dt = \mu_m [S/(K_1 + S)]\, X;$$
$$dS/dt = -\alpha\mu_m [S/(K_1 + S)] X,$$

для **модели Герберта**

$$dX/dt = \mu_m [S/(K_1 + S)] - K_2 X;$$
$$dS/dt = -\alpha\mu_m [S/(K_1 + S)] X - K_2 X$$

Применяя каждую из этих двух моделей для расчетов профиля концентрации каждой секции всего биореактора, определяли сумму отклонений подсчитанных значений от экспериментальной кривой концентрации загрязнителя. При этом

$$\Delta S = \sum_{i=1}^{N} (S_i^{\text{эксп}} - S_i^{\text{расч}}) \to \min$$

Результаты вычислений приведены на рис 4 14 для двух кинетических моделей Из полученных результатов видно, что процесс очистки лучше описывается моделью Герберта В дальнейшем все расчеты и исследования, которые проводились с предложенной математической моделью биореактора, осуществлялись с применением модели Герберта

4.4. Полная математическая модель биореактора

Исследование конструкции и эффективности работы очистных сооружений целесообразно проводить на основе полной математической модели (ПММ) процесса очистки сточных вод в стационарных условиях ПММ дает возможность анализировать и прогнозировать протекание биотехнологического процесса для разных режимов функционирования биореактора. Затем на основе выбранного критерия оптимизации принимается решение о дальнейших этапах экспериментального исследования и переходят к стадии проектирования и совершенствования конструкции в реальных условиях

Как уже было сказано, ПММ включает в себя уравнения материального баланса микробиальной биомассы, утилизации субстрата и растворенного кислорода Кроме того, модель учитывает массоперенос кислорода из газовой фазы в жидкую и отражает работу всех секций биореактора Весь биореактор рассматривается как каскад последовательных модулей В каждом модуле имеются две рабочие секции Первая - реакционная с плавающей в растворе насадкой и прикрепленными к зернам насадки микроорганизмами - служит для обеспечения биодеградации органического за-

грязнителя Вторая секция называется эрлифтной, и туда подается только воздух для аэрации среды Размещение и ориентация секционных модулей показаны на рис 4 15 Каждый модуль работает как самостоятельный биореактор, для которого вполне справедливы все уравнения материального баланса по жидкой L и газовой G фазам Если рассматривать аппарат как массообменный, то его следует декомпозировать и рассмотреть процесс биологической очистки для отдельного i-го модуля

Анализ показал, что каждую секцию в отдельности можно описать по отношению к движению жидкости как модель идеального вытеснения, а весь модуль – исходя из механизма протекания процесса как декомпозиционной модели с внутренним рециркуляционным потоком (R)

Кинетические и технологические параметры модели. В математической модели процесса очистки сточных вод, представленной системой уравнений (4 39), использован ряд кинетических и технологических констант Для их оценки необходимо иметь экспериментальные данные о процессе в реальном режиме работы

Главным условием оценки констант математической модели является выбор критерия поиска Обычно в качестве такого критерия принимается минимальное отклонение (δ) расчетных кривых от экспериментальных, т е

$$\delta = \min \sum_{i=1}^{N} (y_i^э - y_i^р)^2,$$

где $y_i^э$, $y_i^р$ – соответственно экспериментальные и расчетные значения кривых отклика За отклики принимали концентрацию субстрата, т е загрязнение воды и количество растворенного кислорода на выходе каждого модуля всего биореактора

Математическая модель процесса очистки бытовой воды с помощью модульного биореактора включает 7 кинетических констант и 5 технологических, которые оценивались по эксперименту Первоначально оценку констант проводили, пользуясь экспериментальными данными только для одного модуля Это было сделано исходя из следующих предположений

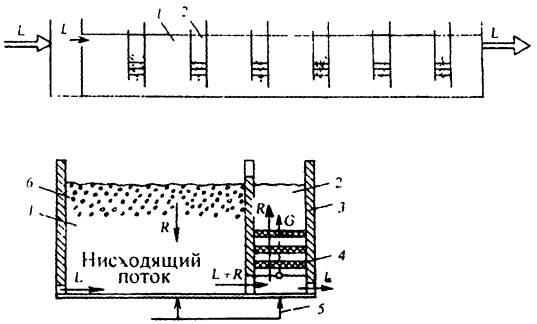


Рис 4 15 Схема модуля биореактора с фиксированной биомассой
1 – реакционная секция, *2* – эрлифтная секция, *3* – перегородка, *4* – диспергирующие решетки, *5* – воздухопроводы, *6* – плавающая насадка с фиксированной биомассой, буквенные обозначения G, L и R приведены на рис 4 13

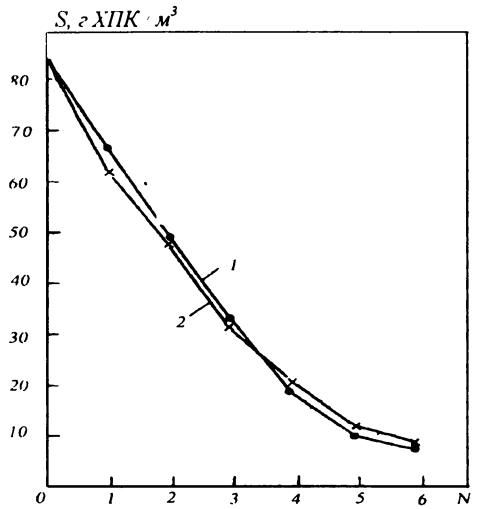


Рис 4 16 Профиль концентрации загрязнителя по секциям
1 — экспериментальные точки,
2 — расчетные значения

1 Считали, что полученные константы будут применимы для всего реактора и что отклонения по модели не будут большими.

2. Не было достаточных экспериментальных данных для распределения концентрации загрязнения и кислорода по всем модулям биореактора и при разных режимах работы

3 Предполагалось, что программная реализация такого поиска будет проще, а процесс поиска будет идти быстрее

С помощью разработанного алгоритма и программы расчета оценивались кинетические константы, при этом исходили из вышеуказанных соображений Затем на базе оценки параметров решалась прямая задача, т е рассчитывался профиль концентрации загрязнителя по секциям Результаты расчета приведены в табл 4 1, а расчетные и экспериментальные кривые – на рис 4 16 При этом баланс по модели не получился корректным, так как отклонения от экспериментальных значений были достаточно велики Кроме того, были и такие расчеты, где подсчитанное число модулей для заданных условий работы биореактора не совпадало с тем, по которому снимали экспериментальные точки

Чтобы повысить достоверность результатов расчета, оценку кинетических констант осуществляли на базе экспериментальных значений, снятых для всех модулей биореактора Все это привело к усложнению программы для оценки параметров Критерий оптимальности был построен так, чтобы минимизировать сумму отклонений экспериментальной кривой от расчетной, полученной при данной комбинации параметров для всех его модулей Основной идеей теперь было найти такой набор кинетических констант, который удовлетворял бы критерию оптимальности по всем модулям реактора заданной экспериментальной кривой.

Для оценки требуемых кинетических и технологических констант была разработана процедура поиска Константы оценивали по эксперимен-

тальным данным, представленным в табл. 4 2 В качестве целевой функции поиска использовали функционал $F1$ вида

$$F1 = \sum_i \sum_j (y_{ij}^э - y_{ij}^р)^2,$$

где $y_{ij}^э$ – экспериментальные точки кривой отклика, $y_{ij}^р$ – расчетные значения параметров по модели, j – число оцениваемых параметров; i – число рабочих модулей биореактора, заданное экспериментальной кривой отклика.

Минимум целевой функции находили по стандартной процедуре методом скользящего допуска При поиске кинетических констант был наложен ряд ограничении· 1) кинетические и технологические константы находятся в заданном заранее допустимом диапазоне, 2) расчетные значения кривых отклика положительны

Решение математической модели сводится к решению системы из пяти нелинейных алгебраических уравнений типа

$$F_i(x_j) = 0,$$

где i = 1, 2, , N_j (N – число уравнений математической модели), x_j – неизвестные переменные (концентрации загрязнителя, прикрепленных микроорганизмов и растворенного кислорода в каждом модуле)

Таблица 4.1 Константы математической модели

Константа	Значение	Размерность	Константа	Значение	Размерность
R	115,289	м^3/ч	K_La	261,796	ч$^{-1}$
μ_m	0,1128	ч$^{-1}$	α_S	0,9	кг/кг
K_1	41,467	кг/м^3	α_{o_2}	0,223	кг/кг

Таблица 4 2 Экспериментальные точки для оценки констант ПММ и проверка адекватности модели (концентрация биомассы X_V = 2500 г/м^3, для S_0-S_6 в г ХПК/м^3)

L, м^3/ч	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
10	69	42	17	-	-	-	-
23	64	36	18	13	9	-	-
35	81	67	48	36	18	11	7
40	60	33	24	17	12	8	-

Для решения системы уравнений модели использовали метод скользящего допуска. Значения x_j определялись минимизацией функционала вида

$$\Phi = \sum \left[F_i(X_j)\right]^2$$

Так как уравнением модели являются уравнения материальных балансов процесса очистки, протекающего в каждом модуле биореактора, то функционал должен стремиться к нулю. Применяя численные методы для решения системы уравнений модели, получаем приближенное решение

В общей постановке задача нелинейного программирования сводится к минимизации функции $f(x)$, $x \in E^n$ при ограничениях

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, .,m,$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad i = m+1, ..,p,$$

(функции $f(x)$, $h_i(x)$, $g_i(x)$ могут быть как линейными, так и нелинейными)

Алгоритм скользящего допуска позволяет улучшить значения целевой функции как за счет информации, получаемой в допустимых точках пространства решений, так и за счет информации, которую удается получить при прохождении через некоторые точки, лежащие вне допустимой области, но являющиеся близкими к допустимым При такой стратегии оптимизационного поиска задачу можно заменить более простой задачей минимизации $f(x)$, $x \in E^n$ при ограничении $\Phi^{(k)}$-$T(x) \geq 0$, где $\Phi^{(k)}$ – значение критерия скользящего допуска на k-м этапе поиска, а $T(x)$ представляет собой положительно определенный функционал над множеством всех функции, задающих ограничения

Для определения параметров математической модели был реализован "пассивный" стартовый план эксперимента, состоящий из 18 опытов для широкого диапазона изменения управляющих переменных – начальной концентрации органического субстрата S_0 и скорости разбавления D Эксперимент проводили на реальной промышленной станции очистки сточных бытовых вод

Таблица 4 3 Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными

№ опыта	S_i, г ХПК/м^3	S_p, г/м^3	$S_{ср}$, г/м^3	№ опыта	S_i, г ХПК/м^3	S_p, г/м^3	$S_{ср}$, г/м^3
1	38,0	41,0	21,0	10	7,0	7,0	10,0
2	22,0	24,0	5,0	11	29,0	27,0	12,0
3	13,0	13,0	4,0	12	9,0	9,0	8,0
4	8,0	7,0	9,0	13	67,0	62,0	50,0
5	43,0	46,0	26,0	14	48,0	46,0	31,0
6	32,0	34,0	15,0	15	36,0	32,0	19,0
7	27,0	24,0	10,0	16	18,0	21,0	1,0
8	15,0	17,0	2,0	17	11,0	14,0	6,0
9	10,0	11,0	7,0	18	7,0	9,0	10,0

Результаты технологического эксперимента стационарного непрерывного процесса очистки и расчета по математической модели для заданных значений управляющих переменных S_0 и D даны в табл 4 3 (S_i – экспериментальные, S_p – расчетные значения откликов, $S_{ср}$ – экспериментальные средние значения)

При отсутствии параллельных опытов и дисперсии воспроизводимости можно оценить качество аппроксимации принятыми уравнениями, сравнивая остаточную дисперсию $S_{ост}$ и дисперсию относительно среднего S_y

Проверка адекватности осуществлялась с помощью критерия Фишера Остаточная дисперсия $S_{ост}$ вычислялась с учетом экспериментальных данных об утилизации субстрата по всем модулям биореактора

Согласно полученным расчетам для $S_{ср}$ и $S_{ост}$, критерий Фишера вычислялся по формуле

$$F = \left[S_y^2(\nu_{ср})\right] / \left[S_{ост}^2(\nu_{ост})\right]$$

В этом случае критерий Фишера показывает, во сколько раз уменьшается рассеяние относительно полученного уравнения модели по сравнению с рассеянием относительно среднего. Чем больше расчетное значение критерия Фишера превышает табличное для выбранного уровня значимости $P = 0{,}05$ и чисел степеней свободы $\nu_{ср}$ и $\nu_{ост}$, тем эффективнее уравнение выбранной модели

Остаточную дисперсию вычисляли по формуле

$$S_{ост}^2 = \sum_{i=1}^{N} (S_i - S_{расч})^2 / \nu_{ост},$$

где N – число опытов; S_i – экспериментальное значение кривой отклика, $S_{расч}$ – расчетное значение кривой отклика, по модели, $\nu_{ост}$ – число степеней свободы;

$$\nu_{ост} = N - (K + 1),$$

где K – число оцениваемых параметров, $K = 12$ ($\nu_{ост} = 5$).

С использованием значений табл. 4.3 получаем:

$$S_{ост}^2 = 1444/5 \approx 289$$

Дисперсию относительно среднего S_y^2 вычисляем по формуле

$$S_y^2 = (1/\nu_y) \sum_{i=1}^{N} (S_i - S_{ср})^2,$$

$$S_{ср} = \sum_{i=1}^{N} S_i^{эксп} / N,$$

где ν_y – число степеней свободы; $\nu_y = N-1$ (для нашего случая $\nu_y = 17$)

Подставляя соответствующие значения для S_y^2, имеем

$$S_y^2 = 125316/17 \approx 7371;$$

тогда $F_{расч} = 7371/289 \approx 25$.

Согласно таблице распределения, при уровне значимости $P = 0{,}05$ и приведенных значениях ν_y и $\nu_{ост}$, значение критерия Фишера $F_{табл} = 8{,}7$. Поскольку $F_{расч} > F_{табл}$, то с достаточной степенью вероятности можно го-

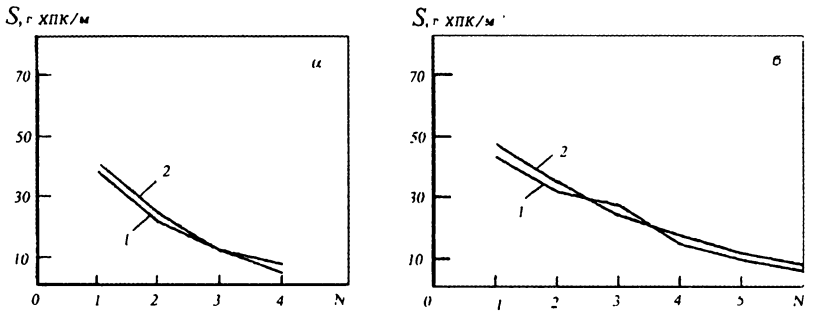


Рис 4 17 Профиль концентрации загрязнителя по секциям при разных входных нагрузках

а – L = 23 м^3/ч, S_0 = 64 г ХПК/м^3, *б* – L = 40 м^3/ч, S_0 = 60 г ХПК/м^3, *1* – экспериментальные данные, *2* – расчетные значения

ворить об адекватности математической модели реальному процессу очистки сточных вод

Чтобы проиллюстрировать адекватность математической модели, проводились расчеты при разных входных нагрузках и сравнивались с экспериментальными значениями концентрации Из результатов, приведенных на рис 4 17, следует, что максимальное отклонение расчетного значения концентрации по секциям биореактора не превышает по абсолютной величине 3 г ХПК/м^3

4.5. Определение концентрации микроорганизмов, фиксированных на носителе

Чтобы определить концентрацию микроорганизмов, надо подсчитать количество биомассы, образовавшейся на поверхности носителя Он представляет собой сферические гранулы из пенополистирола диаметром около 3 мм, что обеспечивает плотность материала около 250-300 кг/м^3, которая необходима для технологической реализации процесса

Толщина биопленки определяется по формуле

$$\delta_x = r_{бч} - r_ч = d_{бч}/2 - d_ч/2,$$

где $d_ч$ – диаметр частицы носителя, $d_{бч}$ – диаметр биочастицы, т е носителя и фиксированной на нем биопленки

Так как гранулы находятся в насыпном состоянии, для заданного диаметра порозность ε принимается равной 0,4. Таким образом, действительный объем $V_д$, занимаемый частицами носителя, составляет

$$V_д = V_н (1-\varepsilon)$$

Тогда число частиц, занимаемых определенным объемом одной секции биореактора, можно подсчитать по формуле

$$N = (V_н/V_ч)(1-\varepsilon) = V_н\varepsilon_эф/V_ч,$$

где $V_н$ – объем, занимаемый носителем в насыпном состоянии; $V_ч$ – объем одной частицы носителя, $\varepsilon_эф$ – эффективная порозность частиц

Объем одной частицы носителя $V_ч = \pi d_ч^3/6$, а объем одной биочастицы с фиксированными на ней микроорганизмами будет $V_{бч} = \pi d_{бч}^3/6$

Таким образом, количество биомассы, фиксированной на одной частице, определяется как

$$m = (V_{бч}-V_ч)\rho_{бп},$$

где $\rho_{бп}$ – плотность биопленки,

а общее количество биомассы, находящейся в одной секции биореактора, по формуле

$$M = Nm \text{ (кг)}$$

С учетом преобразований получим.

$$M = N\rho_{бп}(\pi/6)(d_{бч}^3-d_ч^3),$$

т е количество биомассы в одной секции можем определить через $\rho_{бп}$ биопленки и разницу диаметров биочастицы и частицы носителя Концентрацию микроорганизмов в одной секции определяем как общее количество прикрепленной биомассы, отнесенной к объему жидкой фазы одной секции биореактора

Таким образом,

$$X = [(N\rho_{бп}\pi/6)(d_{бч}^3-d_ч^3)]/V_{ж\,р} = [V_н\varepsilon_эф\rho_{бп}(V_{бч} - V_ч)]/V_ч V_{ж\,р}.$$

Так как $V_{ж\,р}$ – это объем жидкости в одной секции реактора, а $V_ч$ – объем частиц носителя, мы можем произвести замену $V_н/V_{ж\,р} = q$ (некое постоянное число) Тогда

$$X = [\varepsilon_эф\rho_{бп}(V_{бч} - V_ч)/V_ч]q$$

Осуществляя некоторые преобразования, окончательно получаем

$$X = [\varepsilon_эф\rho_{бп}(d_{бч}^3 - d_ч^3)/d_ч^3]q$$

Расчеты проводили для частицы диаметром $d_ч = 3{,}0\cdot10^{-3}$ м, плотность биопленки $\rho_{бп} = 1020$ кг/м^3, диаметр биочастицы $d_{бч} = 3{,}1\cdot10^{-3}$ м, т е толщина биопленки составляет около 50 мкм, $q = 0{,}04$ Тогда

$$X = 0{,}6 - 1020\ \{[(3{,}1\cdot10^{-6})^3 - (3{,}0\cdot10^{-6})^3]/3{,}0\}0{,}04 = 2500 \text{ г/м}^3$$

Так как лабораторные исследования показали, что толщина биопленки составляет 50-70 мкм, то в дальнейших расчетах принимали, что концентрация микроорганизмов может составлять до 2700 г/м^3 для заданного объема, занимаемого частицами носителя Поскольку толщина биопленки достигает заданного предела, то концентрацию биомассы в реакторе можно регулировать, меняя количество частиц носителя и, тем самым, значение числа q

Чтобы обеспечить необходимую концентрацию микроорганизмов в биореакторе, в него с помощью рециркуляционного потока подавали активный ил В таком режиме биореактор работал свыше трех месяцев, концентрация микроорганизмов поддерживалась от 800 до 12000 г/м^3 В это же время биореактор работал как эрлифтный с суспендированными в нем микроорганизмами Результаты работы заносили в журнал Потом внесли в 6 секций биореактора необходимое количество зернистого носителя Для ускорения процесса фиксации биомассы носитель заранее обрабатывали в специальном устройстве абразивным порошком для создания шероховатой поверхности При определенной концентрации микроорганизмов в биореакторе процесс фиксации длился около месяца, затем отключали рециркуляционный поток, а дебит воды доводили до 7-10 м^3/ч В таком режиме биореактор работал до тех пор, пока толщина пленки хорошо сформировалась Она была достаточно заметна на глаз, ее толщина колебалась от 40 до 70 мкм Для расчетов принимали толщину биопленки равной 50 мкм Уже со сформированной биопленкой были проведены исследования, при этом дебит поступающей в биореактор воды меняли в пределах 20-40 м^3/ч, а концентрация по ХПК зависела от нагрузки загрязнения поступающей воды, т е регулировать ее или поддерживать было нельзя Экспериментальные данные при различных режимах работы даны в табл 4 4 Дебит воздуха в каждой секции поддерживался порядка 25 м^3/ч

Сравнение работы биореакторов с фиксированной и плавающей биомассой показало, что первый вариант более предпочтителен Это видно из рис 4 18, где показан процесс утилизации субстрата двумя способами

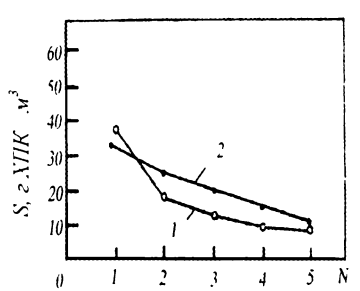


Рис 4 18 Профили изменения концентрации загрязнителя
1 – для активного ила [скорость очистки ω 18 3 г (м^{3}ч) τ 3 ч] 2 – с фиксированной биомассой [ω 19 25 г (м^{3}ч) τ 2 ч]

Большую скорость окисления можно объяснить наличием постоянной концентрации фиксированных микроорганизмов и их постоянным составом Кроме того, по эффективности биореактора и скорости очистки новая конструкция была лучше существующей

Все это дало основание предложить эрлифтный биореактор с фиксированной биомассой для реального использования в уже действующей станции очистки сточных бытовых вод

Таблица 4 4. Экспериментальные данные о работе биореактора с носителем и фиксированной на нем биомассой ($S_0 - S_6$ в г ХПК/м^3)

L, м^3/ч	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
10	26	-	-	-	-	-	-
10	17	-	-	-	-	-	-
10	69	42	17	-	-	-	-
10	43	-	26	-	16	-	-
40	60	33	24	17	12	8	-
40	34	-	25	-	17	-	-
40	52	28	20	15	12	10	-
40	25	17	-	-	-	-	-
35	81	67	48	36	18	11	7
35	45	40	-	27	-	18	-
35	45	30	-	17	-	8	-
35	27	-	-	9	-	-	-

4.6. Эрлифтный биореактор с плавающей насадкой и фиксированными на ней микроорганизмами

Опытный биореактор представляет собой бассейн длиной 10 м, шириной 3,5 м и глубиной 2,5 м. В бассейне имеются секции, конструктивно выполненные по модульному принципу В одном модуле расположены эрлифтная и реакционная секции (рис 4 15). Модули отделены друг от друга плотной перегородкой высотой 2,0 м

Эрлифтная секция имеет ширину 0,2 м На высоте 0,2 м от дна биореактора находятся перфорированные трубы, которые служат для насыщения биореактора воздухом Над барботерами на расстоянии 0,2 м друг от друга расположены три ряда диспергирующих решеток, которые помогают удалять накопленную на частицах носителя биомассу и регулировать толщину биопленки В эрлифтной секции осуществляется только процесс аэрирования Воздушный поток поднимается вверх, увлекает частицы носителя и перебрасывает их в другую секцию Внутренний рециркуляционный поток создается за счет разницы плотностей двух жидких фаз эрлифтной и реакционной секций Эрлифтная секция отделена от реакционной плотной перегородкой, высотой 1,80 м Уровень воды в биореакторе поддерживается на этой высоте, что облегчает барботажному потоку перенос частиц носителя через отверстия стенки в реакционную секцию

Реакционная секция имеет ширину 0,6 м В ней находятся только частицы носителя с прикрепленными к ним микроорганизмами, в результате образуется биочастица плотностью 200-300 кг/м^3 и диаметром около 3 мм Благодаря имеющимся на поверхности неровностям микроорганизмы прочно закрепляются в ее активных центрах и создают оболочку био-

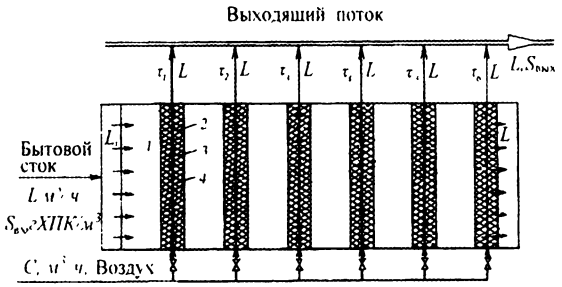


Рис 4 19 Общий вид биореактора и схема потоков

1 – реакционная секция, *2* – эрлифтная секция, *3* – диспергирующие решетки, *4* – воздухопроводы

пленки Плотность самой биопленки практически равна плотности воды (1020 кг/м^3) Биопленка сравнительно мягкая, рыхлая и пористая и не затрудняет диффузию внутрь биомассы Процесс очистки, т е утилизация органического субстрата, осуществляется за счет поддержания на постоянном уровне концентрации микроорганизмов, образовавших биопленку В биологической очистке участвуют и плавающие в растворе микроорганизмы, но их концентрация на порядок ниже и обычно колеблется, так что их вклад в очистку невелик Весь биобассейн заполнен шестью такими модулями

Общий вид биобассейна, а также устройство биореактора и расположение отдельных модулей показаны на рис 4 15 и 4 19

Принцип работы одного модуля. Как уже отмечалось, модуль состоит из реакционной и эрлифтной секций В реакционной секции находятся частицы носителя, которые в насыпном виде занимают 1/20 часть объема самой секции Так как плотность частицы меньше плотности воды, частицы всегда плавают на поверхности С течением времени они покрываются микроорганизмами, и начинается формирование биопленки Толщина биопленки постепенно растет, благодаря чему масса биочастицы также увеличивается В эрлифтную секцию непрерывно подается воздух с дебитом около 25 м^3/ч За счет разницы в плотностях среды в этих секциях создается внутренний рециркуляционный поток, который движется снизу эрлифтной секции вверх и переходит в реакционную, а потом направляется вниз этой секции Вместе с потоком увлекаются и те частицы, которые под действием силы тяжести опустились вниз Циркулирующий поток направляет биочастицы вверх, и когда они проходят через диспергирующие решетки, часть биопленки механически стирается в результате трения между биочастицами Биочастицы всплывают вверх и с рециркуляционным потоком вновь поступают в реакционную секцию Этот процесс идет непрерывно, отработанная биомасса оседает на дно, а потом выносится из реактора с потоком

В конструкции специально предусмотрена перегородка, разделяющая модули, высотой большей, чем высота перегородки между секциями

Нижний конец перегородки отстоит от дна на 10 см, чтобы задерживать частицы носителя и способствовать их перемещению вверх Перего-

родка между секциями находится на расстоянии 20 см от дна биобассейна, что дает возможность биочастицам свободно перемещаться из реакционной секции в эрлифтную

Биопленка формируется на частичках из пенополистирола плотностью 200-300 кг/м^3 Эти частички под действием центробежных сил перемешиваются со специальным абразивным порошком, в результате чего их поверхность покрывается очень мелким порошком, на котором и задерживаются микроорганизмы Обработанный таким образом носитель загружается в биореактор, им заполняются также реакционные секции

4.6.1. Результаты эксперимента и их обработка

Сначала реактор работает как эрлифтный биореактор с суспендированными в жидкой среде микроорганизмами Концентрация биомассы обеспечивается за счет обратного потока активного ила Затем в реактор вносят необходимое количество носителя, на поверхности которого формируется биопленка Когда этот процесс полностью заканчивается, подача активного ила приостанавливается Дальнейшее формирование биопленки продолжается только на поверхности частиц носителя, часть микроорганизмов развивается в жидкой среде В результате их концентрирования осуществляется утилизация субстрата, т е процесс очистки органического вещества Полученные экспериментальные данные приведены в табл 4 4

4.6.2. Результаты моделирования

С помощью полной математической модели (ПММ) были проведены расчеты биореактора для различных режимных условий Меняя нагрузку по ХПК и расход входящей воды в допустимых пределах, определяли оптимальное число секций и изменение концентрации органического вещества по секциям для конкретной комбинации работы биореактора Рассчитанные значения (табл 4 5) могут служить основанием для рекомендаций по технологии проведения процесса Было исследовано влияние скорости разрежения (разбавления) на степень очистки при постоянном объеме биореактора при числе секций, равном 6

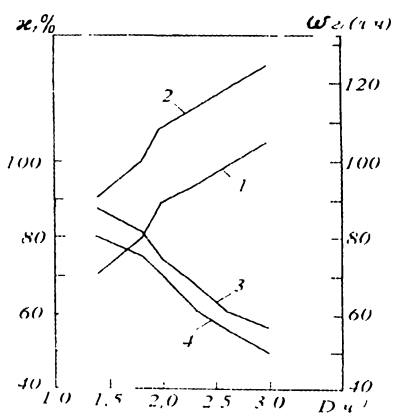


Рис 4 20 Зависимость степени очистки воды κ (*1,2*) и скорости очистки загрязнителя ω (*3,4*) в биореакторе от скорости разбавления *D*
1, 3 – S_0 60 г ХПК м^3 *2, 4* – S_0 80 г ХПК м^3

При малых дебитах, т е низких скоростях разбавления, заданную выходную концентрацию удавалось достигнуть в 3-й и 4-й секциях, где степень очистки составляла 82-87 % Это свидетельствует о том, что реактор с таким объемом неэффективно применять при входной концентрации S_0 = 60 г ХПК/м^3 и дебите воды меньше 30 м^3/ч.

С помощью модели было исследовано также влияние скорости разрежения (разбавления) на степень очистки при различных начальных концентрациях по ХПК Затем для этих условий рассчитали также скорость процесса очистки (рис 4 20) Из полученных кривых видно, что с увеличением скорости разрежения при постоянном объеме биореактора скорость процесса изъятия органического вещества тоже увеличивается Кроме того, можно отметить, что при S_0 = 80 г ХПК/м^3 скорость очистки больше, чем при 60 г ХПК/м^3 Таким образом, реактор с таким объемом можно применять при более высоких концентрациях загрязняющих веществ, которые возможны на практике

При проверке влияния входной концентрации на степень очистки воды оказалось, что с увеличением S_0 степень очистки для заданного объема снижается Более высокая степень очистки получается при дебите 30 м^3/ч Это логически более правильно, так как в первом случае продолжительность контакта микроорганизмов с загрязненной водой больше, чем во втором

С увеличением дебита входящей воды при постоянном объеме биореактора и двух заданных начальных концентрациях на выходе биореактора концентрация загрязнителя увеличивается, т е при высоких начальных концентрациях и высоких скоростях вода не успевает очиститься

Таким образом, чтобы довести выходную концентрацию загрязнителя до искомых санитарных норм (в нашем случае до 10 г ХПК/м^3), следует увеличить число секций

С помощью математической модели пытались предсказать число секций для начальных дебитов L и концентраций S_0 Определяли влияние L и соответствующего объема биореактора на время пребывания воды в реакторе, при котором достигается заданная степень очистки Так, например, для обеспечения $\kappa > 80$ % при S_0 = 60 г ХПК/м^3 и L = 80 м^3/ч нужен биореактор объемом V = 50 м^3 и временем пребывания 0,63 ч, при L = 80 м^3/ч и S_0 = 80 г ХПК/м^3 необходимый объем реактора составит 66 м^3, а время пребывания в нем – 0,82 ч Таким образом, анализ показал, что при одинаковых дебитах и начальных концентрациях(S_0),равных 80 и 60 гХПК/м^3, для достижения необходимой выходной концентрации при более низкой входной требуется меньшее время пребывания

Одной из основных целей расчета биореактора является определение оптимальных параметров его работы при минимальном расходе воздуха

В настоящее время экономия при высоком качестве очищаемой воды – проблема крайне актуальная Вот почему был рассчитан профиль концентрации по ХПК при заданных входной концентрации и числе секций, а расход воздуха G на каждую секцию оставался постоянным, (25 м^3/ч) Такой же профиль наблюдался и в реальных условиях Интересно было проверить, как будет вести себя реактор при уменьшении расхода воздуха по соответствующим секциям Эта идея была продиктована условием, что

Таблица 4.5 Технологический каталог для прогнозирования работы биореактора при требуемой $S_{вых} \leq 10$ ХПК $м^3$

L,$м^3$/ч	$S_{0,}$ г ХПК/$м^3$			
	40	60	80	100
20	15,24 3 77 0,739	15,24 3 83 0,793	20,32 4 87 0,993	25,4 5 90 1,247
30	15,24 3 77 0,493	20,32 4 83 0,66	30,48 6 87 1,02	30,48 6 90 1,001
40	20,32 4 77 0,497	30,48 6 83 0,751	35,56 7 87 0,878	40,68 8 90 1,005
60	30,48 6 77 0,5	40,64 8 83 0,67	50,80 10 87 0,839	55,88 11 90 0,924
80	35,56 7 77 0,439	50,80 10 83 0,629	66,04 13 87 0,82	76,2 15 90 0,947
100	45,72 9 77 0,453	66,04 13 83 0,656	81,28 16 87 0,808	91,44 18 90 0,91
	I' N к τ			

Обозначения в таблице I' – общий объем биореактора, $м^3$, к – степень очистки, %, τ – время пребывания, ч, N – число секций

концентрация ХПК по секциям к выходу падает, поэтому необходимое количество кислорода для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов и окисления субстрата также должно уменьшаться С помощью модели проводили расчеты, уменьшая расход воздуха по каждой секции

Полученный профиль концентрации по ХПК для каждой секции не отличался от такового для случая, когда расход воздуха оставался постоянным Это позволило для реального процесса очистки при заданном объеме биореактора дать рекомендации по уменьшению количества подаваемого воздуха от первой секции к последней При таком режиме работы экономия расхода воздуха составила 14 % Результаты работы биореактора при новом режиме приведены в табл 4 5 Кроме того, исследовалось влияние на процесс очистки уменьшения концентрации биомассы по секциям, поскольку при заниженном количестве питательной среды и воздуха для утилизации субстрата необходимо и меньшее количество микроорганизмов

Если исходить из соображения, что концентрацию микроорганизмов можно регулировать путем изменения количества носителя в реакционной секции, то, варьируя расход воздуха, можно изменять распределение концентрации микроорганизмов по секциям При этом профиль изменения концентраций выбрали таким, чтобы на вход биореактора подавать больше воздуха при высокой концентрации биомассы, когда нагрузка субстрата больше

Таким образом, по всем секциям общие количества воздуха и биомассы были меньше, чем в том случае, когда их поддерживали постоянными Это, соответственно, привело к экономии материала носителя и энергии

Чтобы оценить скорость очистки в новом реакторе, сравнивали его работу при одинаковых входных концентрациях с работой традиционного биобассейна с шестью погружными аэраторами Так, биобассейн при концентрации субстрата на входе 61 г ХПК/м^3 позволяет получить на выходе концентрацию 17 г ХПК/м^3 при времени пребывания 4 ч, в то же время, как показали экспериментальные данные, новый биореактор позволяет получить на выходе 10 г/м^3 при входной концентрации 81 г/м^3 и времени пребывания 2 ч

После того как все эти результаты были рассчитаны по математической модели, стало ясно, что полученные результаты для нового биореактора достигаются при объеме в два раза меньшем, чем объем традиционного биобассейна Это объясняется тем, что расчеты делаются от секции к секции до достижения заданной концентрации в секции, а затем объемы секции суммируются и определяется общий объем биореактора В реальном биобассейне работает весь объем биореактора При анализе полученных результатов стало ясно, что новый реактор, согласно результатам эксперимента, имеет в три раза большую скорость очистки, чем традиционный, а по теоретическим расчетам скорость очистки в биореакторе превышает существующую в 6 раз Так, для существующего биобассейна с учетом приведенных выше результатов скорость очистки составит

$$\omega_1 = (61{,}0 - 17{,}0)/4 = 11 \text{ г ХПК/(м}^3\cdot\text{ч)}$$

Для нового биореактора при экспериментально полученном времени пребывания 2 ч скорость очистки составит

$$\omega_2 = (81{,}0 - 10{,}0)/2 = 35 \text{ г ХПК/(м}^3\cdot\text{ч)}$$

При расчете по математической модели для S_0 = 81 г ХПК/м^3, чтобы обеспечить на выходе концентрацию, равную 10 г ХПК/м^3, объем нового реактора должен составлять 35 м^3, а его нагрузка 35 м^3/ч При этом время пребывания в нем составит 1 ч, а скорость очистки будет составлять

$$\omega_3 = (81{,}0 - 10{,}0)/1{,}0 = 71{,}0 \text{ г ХПК/(м}^3\cdot\text{ч)}$$

Проведенный анализ позволяет прогнозировать эффективное использование каждого модуля предлагаемой конструкции Для достижения вышеуказанного эффекта необходимо поток воды выводить из того модуля, где достигнута требуемая концентрация, при соответствующих входных нагрузках с использованием рециркулирующих потоков R (см рис 4 15)

4.7. Математическая модель процесса осаждения

Одним из важных моментов очистки сточных вод, и особенно биологической очистки, является процесс осаждения Рассмотрим механизм осаждения частиц во вторичном отстойнике

На кинетику процесса осаждения влияют такие факторы, как размер и форма частиц, их концентрация, вязкость среды При осаждении хлопьев ила происходит их слипание (флоккуляция), что ускоряет этот процесс Следует также учитывать влияние гидродинамических факторов движения жидкости в отстойнике, так как на практике процесс отстаивания осуществляется непрерывно

Наблюдая за процессом осаждения, можно выделить несколько фаз (рис 4 21) В первой фазе (A) хлопья оседают со скоростью, которая одинакова почти по всей глубине,поэтому концентрация частиц ила в этой фазе постоянна Скорость движения границы в фазе A зависит от начальной концентрации хлопьев чем она выше, тем меньше скорость осаждения

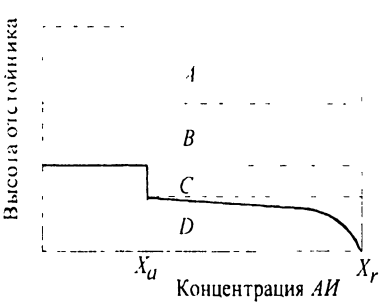


Рис 4 21 Распределение концентрации активного ила по глубине отстойника

A - зона осветления ($x \cong 0$). *B* - нейтральная зона ($0 < x < x_u$) *C* - зона постоянного состава ($x \cong x_u$). *D* - зона уплотнения ($x_u < x < x_r$). *C* - *D* - зона ила)

Во второй фазе (*B*) движение границы вниз замедляется, происходит отделение слоя осветленной жидкости от иловой массы Это связано с тем, что по мере накопления биомассы на дне цилиндра верхние слои иловой массы начинают испытывать тормозящее влияние со стороны нижних слоев

В фазе (*C*) концентрация иловых хлопьев становится столь большой, что их нижние слои уплотняются Под действием сжимающего усилия верхних слоев вода продавливается через иловую массу (фаза *D*), плотность которой увеличивается, а граница, разделяющая очищенную воду и иловую массу, продолжает опускаться Распределение концентрации активного ила по глубине отстойника показано на рис.4.21

Итак, во вторичных отстойниках аэрационных сооружений одновременно происходят три процесса разделение иловой смеси, осветление надыловой воды, предварительное уплотнение активного ила Для описания процесса осветления очищенной жидкости во вторичном отстойнике была предложена так называемая "теория канальцев", ее авторы (Э Эггерс и М Дорн) рассматривают осаждаемый ил как одеяло, пронизанное системой канальцев, которые служат для вытеснения воды

Соответствующая схема представлена на рис 4 22 Ил ("одеяло") перемещается по направлению вниз со скоростью W (относительно неподвижной стены), при этом через имеющиеся в иле канальцы вода вытесняется вверх со скоростью $V_к$ (относительно той же неподвижной стены) и со скоростью V_w, когда рассматривается поток вдоль стены

Модель была разработана для условий осаждения, при которых не имеют место ни ускорение, ни замедление, т е W, $V_к$, V_w являются постоянными величинами Отсутствие ускорения или замедления движения ила в рассматриваемой области означает, что результирующая сила, действующая на ил, равна нулю Отсюда действующая на ил сила тяжести равна по величине суммарной силе сдвига, возникающей в результате разности скоростей перемещения ила и жидкости.

Баланс сил записывается в виде суммы.

$$F_z = F_s + F_w,$$

где F_z – сила тяжести, действующая на слой; F_s и F_w – действующие на ил силы сдвига, обусловленные соответственно течением жидкости по канальцам и течением жидкости вдоль стенки отстойника

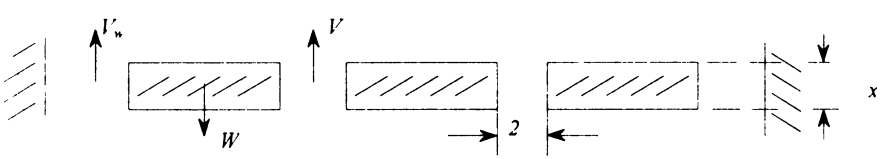


Рис 4 22 Схема осаждения ила

В свою очередь сила тяжести F_z, действующая на слой ила толщиной ΔX, будет равна

$$F_z = C_v(\rho_и - \rho_в)gS\Delta X,$$

где C_v – объемная концентрация ила, $\rho_и$ – плотность ила с приставшей к ней водой, $\rho_в$ – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, S – сечение цилиндрического отстойника

Для силы сдвига F_s в пересчете на слой X можно записать

$$F_s = n\pi R^2\Delta P_к,$$

где n – число канальцев в сечении; R – средний радиус канальцев в иле, $\Delta P_к$ – перепад давления в канальце длиной ΔX

Путем дальнейших преобразований была получена зависимость между скоростью осаждения W, концентрацией сухого вещества C_m, и диаметром отстойника D.

$$W = A(D)C_m\exp(-C_m/K),$$

где $A(D)$ – член, с помощью которого описывается влияние диаметра отстойника на осаждение. K – константа, учитывающая влияние ила

Полученная модель, основанная на теории канальцев, в достаточной степени удовлетворяет предъявляемым требованиям, когда речь идет о форме кривой осаждения в режиме "зонального осаждения" при концентрации сухого вещества 2,9-6 кг/м^3.

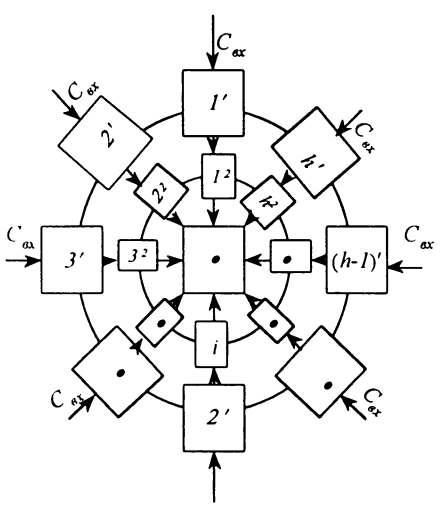


Рис 4 23 Структура потоков в отстойнике

Процесс осаждения взвешенных веществ во вторичном отстойнике можно представить в виде ячеечной модели, причем ячейки идеального смешения расположены по периметру отстойника (рис 4 23) В каждую из этих ячеек поступают очищенные сточные воды из аэротенка с концентрацией взвешенных веществ (активного ила), равной $C_{вх}$ Очищаемая жидкость из этих n^1-ячеек(назовем их первой ступенью) с концентрацией $C_{1вых}$ (по взвешенным) поступает в соответству-

ющие n^2-ячейки второй ступени, откуда очищаемая жидкость поступает в последнюю, конечную ячейку K с концентрацией $C_{2вых}$, а из нее суммарным потоком Q вытекает осветленная жидкость с остаточной концентрацией $C_{вых}$

Будем считать, что взаимные потоки между ячейками первой и второй ступеней взаимно компенсируют друг друга, так как в них концентрации и поля скоростей одинаковы.

Гидродинамику ячеек описываем моделью идеального перемешивания В каждую ячейку первой и второй ступеней подаются одинаковые потоки Q_i, определяемые как Q/n м^3/ч С учетом этого математическое описание процесса осаждения во вторичном отстойнике можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{aligned}
\frac{dC_1}{dt} &= \frac{Q}{V_1 n}(C_{вс} - C_1),\\
\frac{dC_2}{dt} &= \frac{Q}{V_2 n}(C_1 - C_2);\\
\frac{dC_3}{dt} &= \frac{Q}{V_3 n}(C_2 - C_3),
\end{aligned} \qquad (4\ 40)$$

где V_1, V_2, V_3 – соответственно объемы ячеек первой, второй и третьей ступеней, Q – общий расход сточных вод во вторичном отстойнике, n – число ячеек в ступени

Система уравнений (4 40) представляет обобщенную математическую модель отстойника в общем виде

Алгоритм расчета вторичного отстойника (рис 4 24) был основан на использовании зависимости горизонтальной составляющей скорости движения воды от расстояния (x)

$$u(x) = \frac{dx}{dt} = \frac{Q}{2\pi x(H - \gamma x)},$$

где x – расстояние от центра отстойника до точки, для которой определяется горизонтальная скорость; H – глубина отстойника в центре, γ – уклон дна отстойника

Скорость осаждения взвеси определяется как

$$u_0 = \frac{dy}{dt} = u(x) - W(x)$$

Порядок расчета радиального отстойника

1 Начало расчета.

2 Задаемся значениями h – глубина проточной части отстойника, значением γ, R – величина половинного радиуса, $C_в$ – концентрация взвешенных веществ, $u(x)$ – скорость выпадения частиц взвеси (определяется экспериментально по кривой осаждения), $P_{зад}$ – степень осветления; Q_{max} – максимально возможное количество подаваемой воды после аэротенка; значение ΔQ

3 Присваиваем значение Q_{max} величине Q.

4 Определяем горизонтальную составляющую по формуле:

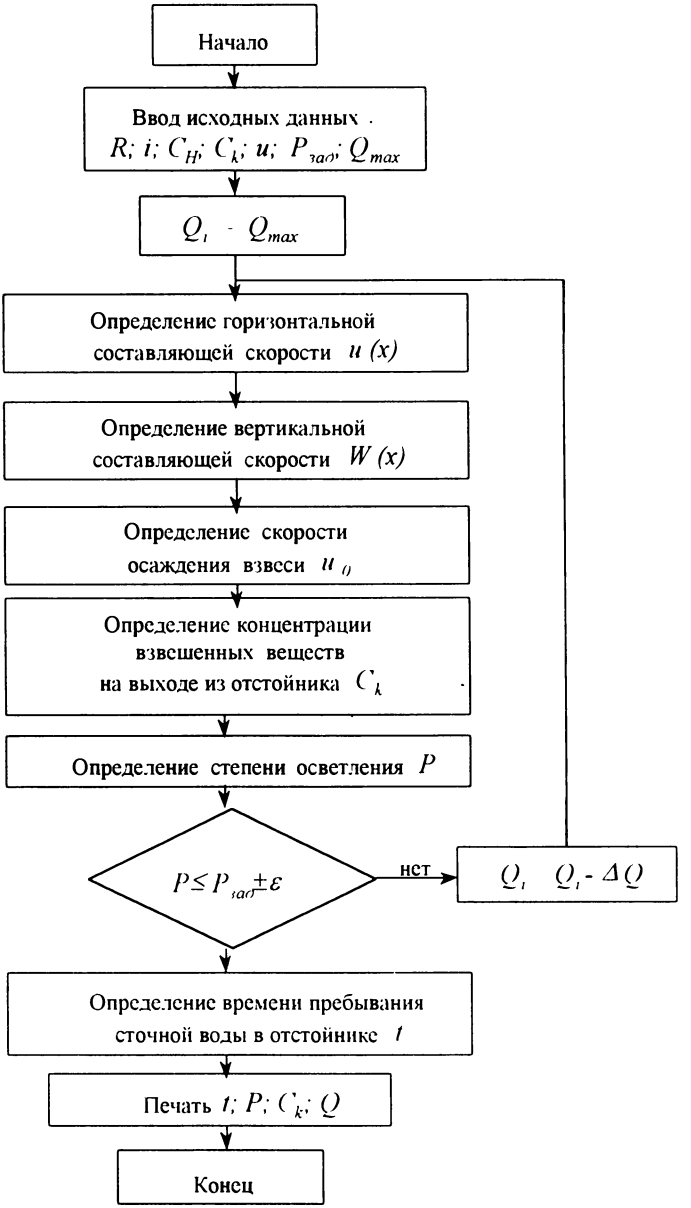


Рис 4 24 Блок-схема алгоритма расчета вторичного отстойника

$$u(x) = Q/(2\pi x(h + x\,tg\gamma))$$

5 Определяем значение вертикальной составляющей скорости

$$W(x) = \frac{1}{26}u(x)$$

6 Определяем значение скорости осаждения u_0 при турбулентном режиме движения воды (взвеси), характерном для отстойников, осаждение частиц тормозится наличием вертикальной составляющей $W(x)$

$$u_0 = u(x) - W(x)$$

7 Определяем значение концентрации взвешенных веществ на выходе из отстойника

$$C_к = C_н \exp(-\tau / t)$$

8 Определяем значение степени осветления P на выходе из отстойника

$$P = [(C_н - C_к)/C_н]100$$

9 Проверяем выполнение условия требуемой степени очистки Если условие не выполняется, то количество воды, подаваемой в отстойник из аэротенка, уменьшается на величину ΔQ, и расчет повторяют с пункта 4 Этот цикл повторяют до тех пор, пока не будет выполняться $P \le P_{зад}$

10 Определяем время пребывания сточной воды в отстойнике $t = V/Q$

11 Выводим на печать результаты расчета Результатом расчета является возможное количество воды, подаваемое в отстойник, при котором сохраняется заданная степень осветления

4.8. Математическая модель процесса биологической очистки сточных вод

Математическая модель процесса биологической очистки сточных вод в аэротенках (4 12), представляющая собой систему дифференциальных уравнений с учетом модели изъятия субстрата микроорганизмами при одновременном их росте и гибели (модель Герберта), в зависимости от организации потоков в аэротенке может деформироваться в более простые

Как известно, одной из наиболее часто встречающихся схем организации потоков в аэротенках является сосредоточенная подача сточной воды и активного ила Математическая модель (4 12) в этом случае приобретает вид

$$D\frac{d^2S}{dl^2} - u\frac{dS}{dl} - \alpha\mu\frac{SX}{K_1 + S} = 0,$$

$$D\frac{d^2X}{dl^2} - u\frac{dX}{dl} - (\mu\frac{SX}{K_1 + S} - K_2X) = 0 \qquad (4\,41)$$

с граничными условиями

при $l = 0$ $\qquad D\frac{dS}{dl} = u(S - S_{вх}),$

$$D\frac{dX}{dl} = u(X - X_{вх}),$$

при $l = L$ $$\frac{dS}{dl} = \frac{dX}{dl} = 0 \qquad (4\,4\,2)$$

В результате получаем систему из двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с граничными условиями, заданными на различных концах

Приведем системы (4 41) и (4 42) к безразмерному виду

$$\frac{1}{L^2}\frac{d^2S}{dz^2} - \frac{u}{D}\frac{1}{L}\frac{dS}{dz} - \frac{1}{D}\alpha\mu\frac{SX}{K_1 + S} = 0,$$

$$\frac{1}{L^2}\frac{d^2X}{dz^2} - \frac{u}{D}\frac{1}{L}\frac{dX}{dz} - \frac{1}{D}(\mu\frac{SX}{K_1 + S} - K_2X) = 0,$$

а граничные условия – к виду

при $z = 0$

$$\frac{1}{L}\frac{dS}{dz} = \frac{u}{D}(S - S_{вх}),$$

$$\frac{1}{L}\frac{dX}{dz} = \frac{u}{D}(X - X_{вх}),$$

при $z = 1$

$$\frac{dS}{dz} = \frac{dX}{dz} = 0 \qquad (4\,43)$$

С учетом того, что $\mathrm{Pe} = \frac{ul}{D}$ и $\frac{L^2}{D} = \frac{L^2}{D}\frac{u}{u} = \frac{lu}{D}\frac{L}{u} = \mathrm{Pe}\bar{\tau}$, ($\bar{\tau}$ - среднее время пребывания), система уравнений (4 43) приводится к виду

$$\frac{d^2S}{dz^2} = \mathrm{Pe}\frac{dS}{dz} + \mathrm{Pe}\bar{\tau}\alpha\mu\frac{SX}{K_1 + S},$$

$$\frac{d^2X}{dz^2} = \mathrm{Pe}\frac{dX}{dz} + \mathrm{Pe}\bar{\tau}(\mu\frac{SX}{K_1 + S} - K_2X)$$

с граничными условиями

при $z = 0$

$$\frac{dS}{dz} = \mathrm{Pe}(S - S_{вх}), \quad \frac{dX}{dz} = \mathrm{Pe}(X - X_{вх})$$

при $z = 1$ $\quad \frac{dS}{dz} = 0, \qquad \frac{dX}{dz} = 0$ (4 44)

Решать эту систему можно одним из методов решения краевых задач, например, методом стрельбы Для этого задаемся приближенным значением концентрации субстрата (S) и активного ила (X) на входе в аэротенк (внутри аэротенка), которые по своему значению будут отличаться от концентрации субстрата $S_{вх}$ и концентрации активного ила $X_{вх}$ (вне аэротенка), причем S будет несколько меньше $S_{вх}$, а X больше $X_{вх}$ за счет продольного перемешивания

Поскольку математическая модель (4 44) представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, очень важное значение приобретает точность задания граничных условий, от которых зависит решение системы Поэтому принимать величину $S = S_{вх}$ и $X = X_{вх}$ по аналогии со случаем режима идеального вытеснения в данном случае нельзя

После выбора приближенных значений S и X определяем, согласно уравнениям (4 44), величины $dS\,dz$ и $dX\,dz$, в результате чего краевая задача сводится к решению задачи Коши, когда граничные условия S, X, $dS\,dz$ и $dX\,dz$ заданы на одном конце границы Решение такой задачи возможно любым численным методом (например, по схеме Рунге–Кутта)

Таким образом, S и X должны быть заданы так, чтобы при $z = 1$ выполнилось условие

$$M_{z=1} = \frac{dS}{dz} = 0, \qquad N_{z=1} = \frac{dX}{dz} = 0 \qquad (4\ 45)$$

Следовательно,

$$M_{z=1} = F_1(S, X); \qquad N_{z=1} = F_2(S, X), \qquad (4\ 46)$$

т е задача сводится к решению системы из двух алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} F_1(S, X) &= 0, \\ F_2(S, X) &= 0 \end{aligned} \qquad (4\ 47)$$

При невыполнении условия (4 47) находим новые приближенные значения S и X (методом Ньютона–Рафсона), и для них находим новые значения $M_{z=1}$ и $N_{z=1}$ Процесс решения продолжают до тех пор, пока не будет выполняться условие (4 45)

Необходимо отметить, что решение уравнений вида (4 44) представляет собой сложную задачу, так как при этом возникают явления неустойчивости, и ошибки расчета начинают накапливаться и возрастать В ре-

зультате не всегда может быть найдено решение системы (4 46) Это наблюдается, когда S и X задаются с недостаточной степенью точности Поэтому решение необходимо производить при малых значениях Pe, например, Pe = 0,1, при котором система устойчива Для данного Pe задаются приближенные значения S и X, после чего рассмотренным выше методом производится дальнейший расчет. Полученные расчетные значения S и X при $z = 0$ для Pe = 0,1 будут являться приближенными значениями S и X при $z = 0$ для Pe = 0,2, а расчетные значения S и X для Pe = 0,2 – приближенными значениями S и X для Pe = 0,3 и т д Решение продолжают до тех пор, пока не будет выполняться условие $Pe = Pe_{зад}$ Алгоритм расчета представлен на рис 4 25

В случае работы аэротенков в режиме рассредоточенной подачи сточной воды, а также при использовании механических аэраторов математическая модель процесса биохимической очистки сточных вод (4.12), как было отмечено ранее, деформируется в ячеечные модели с обратными потоками (4 21) и (4.22), представляющие собой систему нелинейных алгебраических уравнений Решение этой системы уравнений осуществляется методом Ньютона–Рафсона

Представим алгоритмические сведения перехода системы из четырех дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений

Введем обозначения $R_1 = \dfrac{dS}{dz}$, $R_2 = S$, $R_3 = \dfrac{dX}{dz}$ *и* $R_4 = X$, запишем

$$\frac{d^2S}{dz^2} = \frac{dR_1}{dz}, \quad \frac{d^2X}{dz^2} = \frac{dR_3}{dz},$$

тогда система (4 43) примет вид

$$\frac{dR_1}{dz} = \mathrm{Pe}R_1 + \mathrm{Pe}\bar{\tau}\alpha\mu\frac{R_2R_4}{K_1 + R_2},$$

$$\frac{dR_2}{dz} = R_1,$$

$$\frac{dR_3}{dz} = \mathrm{Pe}R_3 + \mathrm{Pe}\bar{\tau}(\mu\frac{R_2R_4}{K_1 + R_2} - K_2R_4),$$

$$\frac{dR_4}{dz} = R_3$$

с граничными условиями

при $z = 0$

$$R_1 = \mathrm{Pe}(R_2 - S_{вх}), \quad R_3 = \mathrm{Pe}(R_4 - X_{вх}),$$

при $z = 1$

$$R_1 = 0, R_3 = 0,$$

Приведем краевую задачу к задаче Коши.

$$(I)\ \ z = 0,\ R_1 = \mathrm{Pe}(R_2^0 - S_{\text{вх}});\ (II)\ \ z = 0,\ R_2 = R_2^0;$$
$$(III)\ z = 0,\ R_3 = \mathrm{Pe}(R_4^0 - X_{\text{вх}});\ (IV)\ z = 0,\ R_4 = R_4^0.$$

Величины $R_2 = S$ и $R_4 = X$ для $z = 0$ задаются. Теперь задача сводится к решению системы алгебраических уравнений типа (4.47):

$$F_1(R_2^0, R_4^0) = 0,$$
$$F_2(R_2^0, R_4^0) = 0.$$

Решение этой системы уравнений осуществляется методом Ньютона–Рафсона с использованием алгоритма, приведенного на рис.4.25.

Для того чтобы проверить точность соответствия математической модели реальному процессу очистки сточных вод, проводится сравнение теоретических и экспериментальных данных. Поскольку любой эксперимент всегда связан со случайными ошибками, опытные данные позволяют найти не истинные значения параметров, а лишь их оценку. В настоящее время используются различные методы оценки параметров: метод наименьших квадратов, принцип максимального правдоподобия, метод оценки на основе теории Байеса и т.д. Для этого необходимо иметь данные, полученные в серии параллельно проведенных опытов.

4.9. Математическое моделирование процесса хлопьеобразования

Сточные воды промышленных предприятий часто представляют собой гетерогенные системы, состоящие из частиц полидисперсной фазы различного происхождения. Очистку таких сточных вод производят путем выделения дисперсной твердой фазы из жидкой среды в отстойниках, в которых коллоидные или тонкодисперсные частицы в результате коагуляции (разделение коллоидного раствора на две фазы: растворитель и студнеобразную массу) и флотации (всплывание твердых частиц с пузырьками воздуха) объединяются в более крупные агрегаты. При коагуляции устраняются силы электростатического отталкивания между частицами, и происходит процесс укрупнения дисперсных частиц за счет их взаимодействия. В результате флоккуляции происходит связывание частиц при участии длинноцепочных молекул (высокомолекулярных полимеров).

С позиции системного анализа процесс агрегации (коагуляция, флоккуляция), протекающий в элементах систем водоочистки, можно условно разделить на два уровня· микроуровень и макроуровень (микро- и макрокинетику)

К микрокинетическим факторам относится совокупность физико-химических эффектов, определяющих скорость протекания физических

или химических явлений на молекулярном уровне и в локальном объеме аппарата В процессе хлопьеобразования это гидролиз, полимеризация и адсорбция

Макрокинетика процесса определяет поведение физико-химической системы в масштабе аппарата в целом. Здесь на эффекты микроуровня накладываются гидродинамические и диффузионные явления крупномасштабного характера, обусловленные конструктивными особенностями элемента очистных сооружений, характером подвода к нему внешней энергии, типом перемешивающих устройств и т п.

Рассмотрим кинетику процесса коагуляции и флоккуляции взвешенных частиц

Для создания условий процесса коагуляции необходимо, чтобы дестабилизированные частицы находились на расстоянии, при котором между ними действуют силы притяжения (ван-дер-ваальсовы силы и химические связи ковалентной природы). Такое сближение обеспечивается броуновским тепловым движением (молекулярно-кинетическая, или перикинетическая, коагуляция) и движением потока жидкости (ортокинетическая коагуляция)

Молекулярно-кинетическая коагуляция заканчивается, когда агрегаты достигают размеров от 1 до 10 мкм, и практически совпадает по времени с периодом распределения коагулянта в воде при смешивании Дальнейшая (ортокинетическая) коагуляция происходит в результате взаимных столкновений частиц твердой фазы на границе движущихся с различной скоростью макро-и микропотоков, возникающих в перемешиваемом объеме воды

Кинетическая зависимость, характеризующая частичное изменение концентрации частиц при перикинетической коагуляции в дискретной форме, имеет вид:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = 2\pi(D_i - D_{k-i})(R_i + R_{k-i})(\sum_{i=1}^{k} n_i n_{k-i} - 2n_k \sum_{j=1}^{\infty} n_j,$$

где k = 1,2,3 ∞, D – коэффициент диффузии, R – радиус действия одной частицы, n – численная концентрация частиц.

Уравнение, определяющее столкновение и соединение частиц с размерами l и m, получают из вышеприведенной формулы

$$\left.\frac{\partial n_l}{\partial t}\right|_{Br} = -4\pi(D_l + D_m)(R_l + R_m)n_l n_m$$

Для учета скорости ортокинетической агломерации частиц в массовом потоке без учета диффузии предложено модифицированное уравнение М. Смолуховского для случая частиц с размерами l и m:

$$\left.\frac{\partial n_l}{\partial t}\right|_{lam} = -\frac{4}{3}(R_l + R_m)^3 n_l n_m \frac{\partial w}{\partial y},$$

где $\partial w/\partial y$ – местный градиент скорости.

При турбулентном потоке это уравнение имеет вид:

$$\left.\frac{\partial n_l}{\partial t}\right|_{\text{turb}} = -\frac{4}{3}(R_l + R_m)^3 n_l n_m \hat{G},$$

где $\hat{G}$– средний градиент скорости.

Это уравнение является базовым и используется при выводе кинетики флоккуляции. Х. Харрис предложил уравнение скорости изменения количества первичных частиц (n_1):

$$-\frac{\partial n_1}{\partial t} = K_0 \delta\, n_1 \hat{G} = r_0, \qquad (4\ 48)$$

где δ – функция распределения размеров, определяющая меру степени роста частиц; K_0 – коэффициент образования хлопьев;

$$\delta = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} n_k (1 + k^{\frac{1}{3}})^3}{\sum_{k=1}^{\infty} k n_k}.$$

М Каванау преобразовал уравнение (4 48)

$$r_0 = K_0 n_1 \hat{G} = -\frac{\partial n_1}{\partial t} \qquad (4\ 49)$$

Это уравнение является основным при описании процесса агломерации частиц в системе.

Помимо агрегации частиц в системе происходит и обратный процесс - разрушение хлопьев, обусловленный воздействием на агрегаты турбулентного потока, градиента скорости G, перепада давлений и эрозии поверхности. Уравнение скорости разрушения хлопьев имеет вид

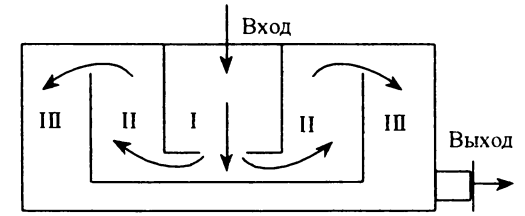
$$r_p = K_p n_2 \hat{G}^m, \qquad (4\ 50)$$

где m – показатель степени (определяют экспериментально), K_p – коэффициент разрушения хлопьев

Из изложенного следует, что для кинетического описания процесса коагуляции и флоккуляции нужно использовать закономерности, учитывающие агрегацию частиц (4.49) и их частичное разрушение (4 50). Объединив их, получим

$$R = r_0 - r_p = -(K_0 n_1 \hat{G}) + K_p n_2 \hat{G}^m \qquad (4\ 51)$$

Для получения полной математической модели процесса хлопьеобразования необходимо кинетическую модель (4 51) дополнить математическим описанием гидродинамической обстановки камеры хлопьеобразования При этом следует иметь в виду, что микро- и макрохлопья перемещаются через реактор подобно элементам жидкости и их движение описывается однопараметрической диффузионной моделью, а концентрации



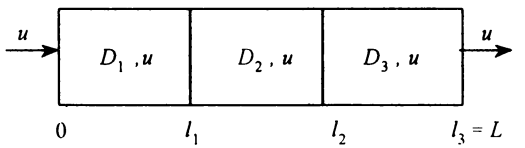


Рис 4 26 Схема аппарата "цилиндрическая мешалка"·
I,II,III - зоны перемешивания аппарата
Рис 4.27 Схема модели аппарата "цилиндрическая мешалка"

взвешенных частиц n_1 и n_2 выражаются соответственно через C_1 и C_2 Учитывая это, уравнение математической модели процесса хлопьеобразования в аппарате в установившемся режиме можно записать в виде

$$D\frac{d^2C_1}{dl^2} - u\frac{dC_1}{dl} + R = 0, \qquad (4\ 52)$$

где D – коэффициент продольного перемешивания; u – скорость движения потока. l – длина пути потока

Подставив в (4 52) уравнение кинетики хлопьеобразования из (4 51), получим

$$D\frac{d^2C_1}{dl^2} - u\frac{dC_1}{dl} - K_0\hat{G}C_1 + K_p\hat{G}^m C_2 = 0 \qquad (4\ 53)$$

Для этого уравнения граничные условия имеют вид

при $l = 0$, $\quad D\dfrac{dC_1}{dl} = u(C_1|_{l=+0} - C_1|_{l=-0})$,

при $l = L$, $\quad \dfrac{dC_1}{dl} = 0$ $\qquad (4\ 54)$

Уравнение (4 53) с граничными условиями (4 54) представляет собой математическое описание процесса хлопьеобразования в одном участке (секции) аппарата "цилиндрическая мешалка" На самом деле аналогичных участков в аппарате три (рис.4.26).

С учетом вышеизложенного, полную математическую модель процесса хлопьеобразования в аппарате "цилиндрическая мешалка" можно описать, согласно рис 4 27, в виде

$$D_1\frac{d^2C_1}{dl^2}-u\frac{dC_1}{dl}-K_0\hat{G}C_1+K_p\hat{G}^m C_2=0,\quad 0\le 1\le l_1,$$

$$D_2\frac{d^2C_1}{dl^2}-u\frac{dC_1}{dl}-K_0\hat{G}C_1+K_p\hat{G}^m C_2=0,\quad l_1\le l\le l_2, \qquad (4\ 55)$$

$$D_3\frac{d^2C_1}{dl^2}-u\frac{dC_1}{dl}-K_0\hat{G}C_1+K_p\hat{G}^m C_2=0,\quad l_2\le l\le L$$

с граничными условиями.

при $l=0$, $\quad D_1\left(\frac{dC_1}{dl}\right)_0-uC_{(0)}=0;$

при $l=l_1$, $\quad D_1\left(\frac{dC_1}{dl}\right)_{l_1^-}-uC_{l_1^-}=D_2\left(\frac{dC_1}{dl}\right)_{l_1^+}-uC_{l_1^+},\ C_{l_1^-}=C_{l_1^+},$

при $l=l_2$, $\quad D_2\left(\frac{dC_1}{dl}\right)_{l_2^-}-uC_{l_2^-}=D_3\left(\frac{dC_1}{dl}\right)_{l_2^+}-uC_{l_2^+},C_{l_2^-}=C_{l_2^+};$

при $l=L$, $\quad \left(\frac{dC_1}{dl}\right)_L=0$

Если же допустить, что значение коэффициента продольного перемешивания D во всех зонах одинаково, то математическую модель (4 55) после соответствующих преобразований можно представить в безразмерной форме

$$\frac{d^2C}{dz^2}-\mathrm{Pe}\frac{dC}{dz}-(\mathrm{Pe\,Ca}\,K_0+\mathrm{Pe\,Ca}\,K_p\hat{G}^{m-1})=\mathrm{Pe\,Ca}\,K_0\hat{G}^{m-1} \qquad (4\ 56)$$

с граничными условиями

$$1=C_{(0)}-\frac{1}{\mathrm{Pe}}\left(\frac{dC}{dz}\right)_0$$

Здесь относительная концентрация

$$C=\frac{C_1}{C_1+C_2}=1-\frac{C_2}{C_1+C_2};$$

величина Pe, относительная длина аппарата (z) и величина Кампа (Ca) соответственно равны

$$Pe=\frac{uL}{D},\quad z=\frac{l}{L},\quad Ca=\overline{G}\,\overline{t},$$

где $\overline{t}$ – среднее время пребывания.

Корни характеристического уравнения (4.56) имеют вид:

$$k_{1,2} = \frac{1}{2}\left[\mathrm{Pe} \pm \sqrt{\mathrm{Pe}^2 + 4\mathrm{PeCa}(K_0 + K_p \hat{G}^{m-1})}\right]. \qquad (4.57)$$

Тогда общее решение уравнения (4.56) можно записать следующим образом.

$$C = T_1 \exp k_1 z + T_2 \exp k_2 z + K_p \hat{G}^{m-1} / (K_0 + K_p \hat{G}^{m-1}). \qquad (4\ 58)$$

Для нахождения коэффициентов T_1 и T_2 воспользуемся граничными условиями (4.57).

$$T_1 + T_2 + \frac{K_p \hat{G}^{m-1}}{k_0 + K_p \hat{G}^{m-1}} - \frac{T_1 k_1}{\mathrm{Pe}} - \frac{T_2 k_2}{\mathrm{Pe}} = 1; \qquad (4.59)$$

$$T_1 k_1 \exp k_1 + T_2 k_2 \exp k_2 = 0.$$

После соответствующих преобразований получим.

$$T_1 = \frac{K_0}{(K_0 + K_p \hat{G}^{m-1})\left[\frac{k_1}{k_2}\exp(k_1 - k_2) - 1 + \mathrm{Pe}^{-1} k_1 (\exp k_2 - \exp k_1)\right]}$$

$$T_2 = \frac{K_0}{(K_0 + K_p \hat{G}^{m-1})\left[1 - \frac{k_1}{k_2}\exp(k_2 - k_1) + \mathrm{Pe}^{-1} k_2 (\exp k_2 - \exp k_1)\right]} \qquad (4.60)$$

Подставим значения T_1 и T_2 в уравнение (4.58) и при $z = 1$ получим значение концентрации на выходе аппарата:

$$C\big|_{z=1} = \frac{(k_1 - k_2)K_0}{(K_0 + K_p \hat{G}^{m-1})\left[k_1 \exp k_2 - k_2 \exp k_1 + \mathrm{Pe}^{-1} k_1 k_2 (\exp k_1 - \exp k_2\right]} + \frac{K_p \hat{G}^{m-1}}{K_0 + K_p \hat{G}^{m-1}}$$

После преобразований уравнений (4 59)-(4.60) можно записать

$$C\big|_{z=1} = \frac{(k_1 - k_2)K_0 \mathrm{Pe}}{(K_0 + K_p \hat{G}^{m-1})\left[k_1^2 \exp(k_1 - \mathrm{Pe}) - k_2^2 \exp(k_2 - \mathrm{Pe})\right]} + \frac{K_p \hat{G}^{m-1}}{K_0 + K_p \hat{G}^{m-1}} \qquad (4\ 61)$$

Из уравнения (4 61) видно, что концентрация первичных частиц (C) на выходе из аппарата ($z = 1$) является функцией четырех параметров

$$C\big|_{z=1} = f(K_0, K_p G, \mathrm{Pe}, \mathrm{Ca})$$

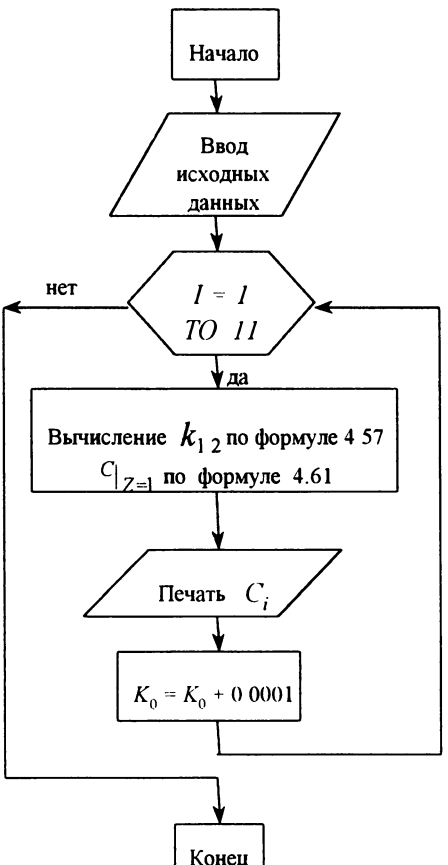


Рис 4 28 Блок-схема расчета концентрации первичных частиц на выходе аппарата при различных значениях коэффициента формирования хлопьев

Исследуем влияние этих параметров на величину C. Для этого проведем анализ уравнения (4 61) На рис 4 28 приведена блок-схема расчета концентрации первичных частиц на выходе аппарата при варьировании коэффициента формирования хлопьев K_0 от 0 до $7 \cdot 10^{-4}$ при постоянных значениях $K_p\hat{G}$, Ре и Са Эта блок-схема использована для расчета концентрации C при варьировании остальных параметров модели. Результаты расчета представлены в табл 4 6

Анализ данных показал, что увеличение коэффициента формирования хлопьев K_0, величины Са и числа Ре приводит к интенсификации процесса хлопьеобразования Уменьшение параметра модели $K_p\hat{G}$ также сопровождается интенсификацией процесса

Таблица 4 6 Зависимость концентрации (С) от параметров модели K_0, $K_p\hat{G}$, Pe, Ca

$C_{вых}$	$K_0 \cdot 10^4$	$C_{вых}$	$K_p\hat{G} \cdot 10^3$	$C_{вых}$	$Ca\ 10^{-3}$	$C_{вых}$	Pe
1,0	0,0	0,098	0,0	1,0	0,0	0,291	0,0
0,63	1,0	0,667	1,0	0,626	1,0	0,199	2,0
0,417	2,0	0,8	2,0	0,414	2,0	0,165	4,0
0,287	3,0	0,857	3,0	0,284	3,0	0,147	6,0
0,203	4,0	0,889	4,0	0,202	4,0	0,136	8,0
0,147	5,0	0,909	5,0	0,147	5,0	0,129	10,0
0,109	6,0	0,923	6,0	0,11	6,0	0,123	12,0
0,082	7,0	0,933	7,0	0,084	7,0	0,119	14,0
0,063	8,0	0,941	8,0	0,066	8,0	0,116	16,0
0,049	9,0	0,947	9,0	0,053	9,0	0,113	18,0
0,039	10,0	0,952	10,0	0,043	10,0	0,111	20,0

4.10. Организация потоков в аэротенках биологической очистки сточных вод

Достоинством обобщенной математической модели (4 12) является то, что она учитывает гидродинамическую обстановку, организацию потоков в аэротенке и кинетику изъятия субстрата микроорганизмами и, вследствие этого, может трансформироваться в более простые модели

Используя это свойство математической модели и основываясь на результатах идентификации ее параметров, определим влияние организации потоков аэротенка на процесс биологической очистки сточных вод

4.10.1. Сосредоточенная подача сточной воды и активного ила

Процесс биохимической очистки сточных вод в аэротенках с сосредоточенной подачей сточной воды и активного ила при сосредоточенном отводе очищенной жидкости описывается однопараметрической диффузионной моделью Величина Ре, характеризующая гидродинамическую обстановку в сооружении, зависит от геометрии аэротенка и расхода воздуха, подаваемого на аэрацию, и может быть изменена по мере необходимости Для оценки степени влияния величины Ре на ход процесса очистки сточных вод были произведены расчеты по модели (4 43) при различных значениях Ре Из результатов расчета (рис 4 29), представляющих собой распределение профиля концентрации субстрата по длине аэротенка, видно, что очищаемая жидкость (смесь сточной воды и активного ила) с концентрацией по загрязнению $S_{вх}$ = 240 г/м^3 и по активному илу $X_{вх}$ = 2000 г/м^3 , соответственно, поступает в аэротенк и быстро разбавляется за счет продольного перемешивания при высоком значении Ре (9,0), концентрация по загрязнению(S) достигает 195 г/м^3,а концентрация по активному илу (X) достигает 2054 г/м^3, при низком значении Ре (3,0), S =150 г/м^3,а X = 2030 г/м^3 Иными словами, степень разбавления пропорциональна степени перемешивания В свою очередь, значения концентраций субстрата S и биомассы X влияют на скорость изъятия загряз-

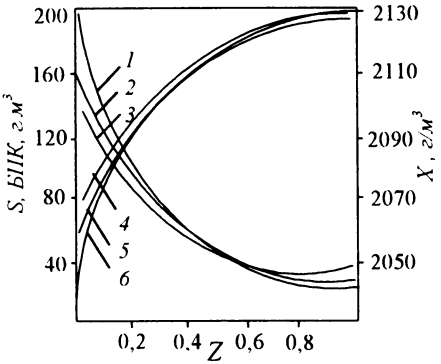


Рис 4 29 Кривые (1.2,3) изъятия субстрата(S) и (4,5,6) роста биомассы (X) в аэротенках с сосредоточенной подачей сточной воды и активного ила при
Pe = 3,0 (кривые 1,4), Pe = 7,0 (кривые 2,5), Pe = 9,0 (кривые 3,6)

нений и скорость роста биомассы

Анализ зависимости изменения скорости потребления субстрата (dS/dt) микроорганизмами при различных значениях Pe показал, что при увеличении Pe от 3,0 до 9,0 возрастает скорость окисления загрязнений по всей длине сооруже ния на входе аэротенка при Pe = 3,0 dS/dt = – 267 г/м^3·ч, а при Pe = 9,0 dS/dt = – 398 г/м^3 ч Т.е скорость изъятия субстрата активным илом во втором случае на 131 г/м^3·ч больше, чем в первом случае Это говорит о том, что увеличение Pe в 3 раза приводит к увеличению скорости окисления субстрата илом в начале аэротенка в 1,5 раза В результате глубина очистки сточной воды при Pe = 3,0 на выходе из аэротенка достигает 28 г/м^3 В то же время такая же глубина очистки, при тех же характеристиках сточной воды, поступающей на очистку, при Pe = 9,0 достигается уже в конце 3-го коридора (3/4 общей длины) четырехкоридорного аэротенка Отсюда следует, что для увеличения производительности аэротенка необходимо уменьшить величину продольного перемешивания Этого можно достигнуть путем уменьшения расхода воздуха на аэрирование Но это, в свою очередь, приводит, во-первых, к уменьшению концентрации растворенного кислорода, необходимого для жизнедеятельности бактерий, во-вторых, может создаться ситуация, при которой не будет обеспечиваться достаточное смешение активного ила и субстрата

4.10.2. Равномерно рассредоточенная подача сточной воды при сосредоточенной подаче активного ила

Примером рассредоточенной подачи сточной воды и активного ила в аэротенк при сосредоточенном отводе очищаемой жидкости, математическая модель которой описывается ячеечной моделью с обратным потоком, являются аэротенки цеха биохимочистки Новомосковского АО "Азот" Из анализа экспериментальных данных работы этих аэротенков видно, что при равномерно рассредоточенной подаче сточной воды в аэротенк концентрация очищаемой жидкости в последующих точках отбора проб аэротенков в некоторых случаях выше, чем концентрация очищаемой жидкости в предыдущих точках Такое распределение профиля концентрации субстрата по длине сооружения объясняется, прежде всего, способом организации потоков в аэротенке При этом весь объем сооружения как бы разбивается на n частей (ячеек), где n – число точек ввода

сточной воды в аэротенк Тогда в первую ячейку поступает сточная вода, разбавленная возвратным активным илом с концентрацией $S^{p}_{1вх}$, определяемой по формуле

$$S^{p}_{1вх} = \frac{S_{пост} G_1' + S_и g}{G_1 + g} \qquad (4\ 62)$$

Здесь G_1, g – объемный расход сточной воды и возвратного активного ила, соответственно, индекс "р" при S означает равномерно рассредоточенную подачу воды с постоянным расходом в каждой точке ввода

Обычно концентрация загрязнений в возвратном активном иле ($S_и$) мала, поэтому уравнение (4.62) можно записать в виде

$$S^{p}_{1вх} = \frac{S_{пост} G_1}{G_1 + g}. \qquad (4\ 63)$$

В ячейке часть загрязнений окисляется активным илом до концентрации S^{p}_{1}

Во вторую ячейку, как и в первую, поступает сточная вода от общего коллектора с расходом $G_2 = G/n$ и концентрацией $S_{пост}$, а также очищаемая жидкость после первой ячейки с остаточным загрязнением S^{p}_{1} и объемным расходом $Q_1 = G_1 + g$ Следовательно, усредненная концентрация загрязнений, поступающих во вторую ячейку, будет равна

$$S^{p}_{2вх} = \frac{S_{пост} G_2 + Q_1 S^{p}_{1}}{G_2 + Q_1} \qquad (4\ 64)$$

Сравнивая (4.63) и (4.64), можно сказать, что значение концентрации $S^{p}_{2вх}$ гораздо выше значений $S^{p}_{1вх}$ Кроме того, среднее время пребывания жидкости в первой ячейке $t_1 > t_2$ Поэтому глубина очистки во второй ячейке должна быть меньше, чем в первой, т е $S^{p}_{2} > S^{p}_{1}$ Следовательно, и в третью ячейку поступает сточная вода с бóльшим содержанием загрязнений, чем во вторую, так что остаточная концентрация на выходе из третьей ячейки (S^{p}_{3}) будет больше остаточной концентрации загрязнений в сточной воде после второй ячейки (S^{p}_{2}) Распространяя эту закономерность на последующие ячейки, можно записать $S^{p}_{i} > S^{p}_{i-1}$, $i = 1,2,3, \ldots, n$

Таким образом, при равномерно рассредоточенной подаче сточной воды вдоль аэротенка и сосредоточенной подаче активного ила на входе аэротенка возможна ситуация, при которой концентрация загрязнений в очищаемой жидкости по мере движения вдоль сооружения не убывает, а, напротив, возрастает Это предположение подтверждается проведенными расчетами по ячеечной модели с обратным потоком Концентрация поступающей сточной воды в общем коллекторе $S_{пост}$ = 200 г/м^3 по БПК$_5$, величина общего объемного расхода (G) в аэротенке равна 1500 м^3/ч, количество возвратного ила (g) принято равным 750 м^3/ч при концентрации $X_{вх}$ = 4000 г/м^3 Общий объем аэротенка V = 4000 м^3 Величина коэффициента продольного перемешивания изменилась от 0 до 2000 м^2/ч при числе вводов n = 3, 5, 9, 17 и 20. Анализ результатов расчетов, выполненных при значениях кинетических констант K_1 = 240 г/м^3, K_2 = 0,005 ч$^{-1}$,

α = 1,97 г/г, μ = 0,38 л/ч показывает, что концентрация загрязнений в каждой последующей ячейке больше, чем в предыдущей при любом количестве вводов сточной воды Так, при n = 3 концентрация субстрата в первой ячейке S^{P}_{1} =10,3 г/м^3 , а в третьей S^{P}_{3} =14,2 г/м^3 При числе вводов n = 20 величина S^{P}_{1} = 8,4 г/м^3, а S^{P}_{20} =15,7 г/м^3

Можно заметить, что с увеличением числа точек ввода сточной воды концентрация субстрата в первых ячейках уменьшается Это объясняется тем, что при увеличении числа вводов n количество поступающей сточной жидкости G_1 уменьшается, вследствие чего увеличивается и степень разбавления сточной воды возвратным активным илом. Благодаря этому можно устранить отрицательное влияние пиковых нагрузок на активный ил, сопровождающихся гибелью микроорганизмов. Но увеличение числа вводов приводит к снижению глубины очистки. Так, например, изменение числа вводов от 3 до 9 значительно влияет на профиль концентрации загрязнений по длине аэротенка, а при n от 17 до 20 кривые изъятия субстрата активным илом почти не отличаются друг от друга Из анализа результатов расчета процесса очистки сточной воды активным илом при различных значениях коэффициента продольного перемешивания, видно, что величина коэффициента диффузии D_T существенно влияет на ход процесса на входе аэротенка и уменьшается на выходе его Очевидно, это можно объяснить тем, что $\Delta S = S_i - S_{i+1}$ (разность концентраций загрязнений) в окрестностях соседних точек ввода на входе аэротенка максимальна и уменьшается до минимума на его выходе

Таким образом, при равномерно рассредоточенной подаче сточной воды 1) концентрация очищаемой жидкости в каждой последующей ячейке больше, чем в предыдущей($S^{P}_{i} > S^{P}_{i-1}$),при любом количестве вводов n, т е. при i= 1, 2, 3 ,..., n, 2) при увеличении числа точек ввода сточной воды n от 3-х до 20-ти степень разбавления последней активным илом увеличивается на входе аэротенка, благодаря чему устраняются отрицательные влияния пиковых нагрузок при залповых сбросах; 3) увеличение коэффициента продольного перемешивания существенно влияет на ход процесса на входе аэротенка. и уменьшается на его выходе

4.10.3. Неравномерно рассредоточенная подача сточной воды при сосредоточенной подаче активного ила

Полученные результаты расчета аэротенков, применительно к условиям равномерно рассредоточенной подачи сточной воды и сосредоточенной подачи активного ила, показали, что такой способ организации потоков, с одной стороны, позволяет избежать в той или иной степени гибель микроорганизмов при залповых сбросах, так как удается понизить нагрузку на ил по загрязнениям в начале аэротенка С другой стороны, такая организация потоков приводит к снижению интенсивности очистки В этой связи возникла необходимость найти способ организации потоков, при котором повысилась бы интенсивность очистки сточных вид с сохранением всех положительных качеств, характерных для аэротенков с равномерно рассредоточенной подачей сточной воды

Одним из таких способов является неравномерно рассредоточенная подача сточной воды Преимущества такого способа подачи перед равномерно рассредоточенной подачей сточной воды заключается в том, что при первом способе организации аэротенка достигается возможность добиться равномерной нагрузки на ил по загрязнению по всей длине аэротенка Это обусловлено изменением функции распределения расхода сточной воды по длине сооружения, $G_1^н = f(Q,L)$, что, безусловно, улучшает показатели работы аэротенков

Рассмотрим один из таких случаев Допустим, что сточную воду общим объемным расходом Q м^3/ч необходимо подать в аэротенк рассредоточенно в трех точках, причем расход сточной воды, подаваемой в первой точке ввода ($G_1^н$), должен быть на столько больше расхода сточной воды, поступающей во вторую точку ввода ($G_2^н$), на сколько $G_2^н$ больше оставшейся части потока $G_3^н$, подаваемого в третью точку, т е должно соблюдаться условие

$$G_1^н - G_2^н = G_2^н - G_3^н = \Delta G \qquad (4\ 65)$$

(индекс "н" означает неравномерную подачу сточной воды)

Такое распределение возможно при условии

$$G_1 = (5/9)\ G, \qquad G_2 = (3/9)\ G; \qquad G_3 = (1/9)\ G,$$

тогда ΔG определяется как разность

$$\Delta G = (5/9)\ G - (3/9)\ G = (3/9)\ G - (1/9)\ G = (2/9)\ G \qquad (4\ 66)$$

Представим себе, что при четырехточечном вводе распределение сточной воды подчиняется этому же закону Тогда, чтобы обеспечить условие (4 65), необходимо, чтобы

$$G_1 = (7/16)\ G; \qquad G_2 = (5/16)\ G, \qquad G_3 = (3/16)\ G; \qquad G_4 = (1/16)\ G$$

Для этого случая ΔG составляет

$$\Delta G = G_1 - G_2 = G_2 - G_3 = G_3 - G_4 = (2/16)\ G \qquad (4\ 67)$$

При сопоставлении значений ΔG в равенствах (4 66) и (4 67) можно увидеть, что числители в первом и во втором случае равны 2, а знаменатели равны квадрату числа точек ввода, т е

$$\Delta G = (2/n^2)G$$

Количество сточной воды, подаваемое в последнюю ячейку, составляет в обоих случаях величину

$$G_n = (1/n^2)G,$$

а в предшествующих ячейках эта величина больше на величину ΔG, чем в предыдущих и равняется

$$G_{n-1} = (1/n^2)G + (2/n^2)G = (3/n^2)G = [(1+2\cdot1)/n^2]G$$

Следовательно, величина потока, подаваемого в ячейку n–2, согласно такому распределению, будет составлять.

$$G_{n-2} = (3/n^2)G + (2/n^2)G = (5/n^2)G = [(1+2\cdot2)/n^2]G$$

Таким образом, объемные расходы, подаваемые в ячейки (n–1) и (n–2), соответственно определяются как

$$G_{n-1} = \{(1+2\cdot[n-(n-1)])/n^2\}G, \qquad G_{n-2} = \{(1+2\cdot[n-(n-2)])/n^2\}G,$$

Тогда, распространяя этот закон для i-й ячейки, можно записать

$$G_i = \{[1+2\cdot(n-i)]/n^2\}G \qquad (4\ 68)$$

где i – порядковый номер ячейки или точки ввода

Рассмотрим работу такой схемы организации потоков аэротенка в сравнении с работой аэротенка при равномерно рассредоточенной подаче сточной воды

Из (4.68) следует, что в первой точке ввода расход сточной воды составляет

$$G_1^{н} = \{[1+2\cdot(n-i)]/n^2\}G,$$

Тогда при n = 3; 5; 10 и 15 величины $G_1^{н}$ будут составлять соответственно 5/9, 9/25, 19/100, 29/225 части потока G, подаваемого в общий коллектор Эта величина расхода сточной воды почти в два раза превышает ее расход при сосредоточенной подаче В результате степень разбавления активным илом загрязнений, поступающих на вход аэротенка, в первых ячейках при неравномерной подаче $G^{н}_1$ будет меньше, чем при равномерной подаче, т е $S^{р}_{1вх} < S^{н}_{1вх}$. В первой ячейке сточная вода очищается до концентрации $S^{н}_1$ и, смешиваясь со вторым потоком, поступает во вторую ячейку Остаточная концентрация после первой ячейки ($S^{н}_1$) будет больше, чем соответствующая концентрация $S^{р}_1$, так как масса поступающих загрязнений вместе со сточной водой в 1-ю ячейку, во втором случае (неравномерная подача сточной воды) будет почти в 2 раза больше, чем в первом случае (равномерная подача), а среднее время (τ) пребывания жидкости в 1-й ячейке, наоборот, будет меньше – $\tau_1^{н} < \tau_1^{р}$ Поэтому значение концентрации $S^{н}_2$ будет несколько выше, чем $S^{р}_2$ Разность $\Delta S^{н} = S^{н}_2 - S^{н}_1$ будет меньше разности $\Delta S^{р} = S^{р}_2 - S^{р}_1$. Благодаря этому при неравномерной подаче сточной воды происходит выравнивание нагрузки на активный ил по длине аэротенка, что позволяет вести процесс окисления субстрата микроорганизмами в более благоприятных условиях, чем при равномерно рассредоточенной подаче

Анализ результатов расчета, проведенного при рассмотренном законе распределения сточной воды и тех же значениях констант, показал, что при неравномерно рассредоточенной подаче сточной воды концентрация загрязнений в начале аэротенка растет и достигает максимума, а затем уменьшается и в конце аэротенка достигает минимума. Это происходит потому, что при рассматриваемом способе организации потоков 1) основная часть сточной воды подается в начальный участок аэротенка, а оставшаяся (минимальная) часть распределяется по последующим участкам; 2) по мере движения очищаемой жидкости происходит изъятие загрязнений Замечено также, что увеличение числа точек ввода сточной воды в аэротенк приводит к увеличению степени разбавления загрязнений активным илом в начале аэротенка (как и для случая с равномерно рассредоточенной подачей сточной воды) Глубина очистки при этом (с увеличением числа точек ввода n) в конце аэротенка также увеличивается, в отличие от равномерной подачи воды, при которой увеличение числа точек ввода приводит к уменьшению глубины очистки в конце аэротенка Это можно объяснить тем, что при равномерной подаче сточной воды в начальный участок аэротенка подается минимальное количество загрязнений, в то время как на этом участке концентрация микроорганизмов максимальна и поэтому активный ил работает не в полную нагрузку При рассматриваемом способе распределения сточной воды активный ил загружен более равномерно с самого начального участка, что обеспечивает высокую производительность аэротенка. Влияние продольного перемешивания на процесс изъятия субстрата илом при неравномерной подаче сточной воды такое же, как и при равномерной подаче

Глава 5

Разработка математических моделей оптимальных схем очистки сточных вод

С целью энерго- и ресурсосбережения, при разработке принципов математического моделирования оптимальных схем очистки сточных вод, необходимо учитывать стратегию применения математических моделей для анализа и синтеза схем водоочистки, а также в системах автоматизированного проектирования новых и действующих очистных сооружений Эта стратегия заключается в следующем

В зависимости от характеристик сточных вод (состав, концентрация и т д) их относят к тому или иному виду в соответствии с системой классификации сточных вод. При этом учитывается группа показателей, интервал изменения этих показателей (параметров), их соотношения Затем при синтезе технологических схем на основе обобщенной схемы водоочистки выбирают альтернативные варианты очистных сооружений Таких вариантов может быть несколько Далее выбранные варианты схем расчленяют на отдельные узлы, агрегаты, элементы и т д Затем, используя математические модели процесса очистки сточных вод в этих аппаратах, определяют конструктивные параметры узлов, агрегатов и аппаратов Если математические описания и алгоритмы расчета отсутствуют, приступают к их разработке, при этом исходят из разработанных ранее базовых математических моделей, изменяя лишь отдельные их параметры (в зависимости от характеристик сточных вод)

Завершающим этапом проектирования является выбор наилучшей схемы из рассматриваемых альтернативных вариантов За критерий оптимальности при этом принимается оценка, учитывающая «затраты», «устойчивость» и «безопасность»

5.1. Система классификации сточных вод

При разработке системы классификации сточных вод (СВ) следует руководствоваться тем, что эта система предназначена для проектировщика и служит основой при выборе как методов очистки, их сочетаний и комбинаций, так и типа аппаратов и режима их работы

Основой системы классификации являются положения и идеи, предложенные академиком РАН С Яковлевым и его школой, а также академиком Украинской академии наук Л Кульским В работе Е Есенова эта система классификации была модернизирована и реализована в виде пакетов программ, в результате чего она может использоваться при автоматизированном проектировании систем водоочистки При разработке такой классификации сточных вод учитывают информацию о составе и концентрации примесей и диапазоне их возможных колебаний Кроме того, в технологии водоочистки применяют тот или иной метод только в том случае, если выполняются некоторые условия Так, например, для процесса осаж-

дения необходимо, чтобы температура сточных вод была 15-40°С, содержание ПАВ не более 50 мг/л и т д Для биологической очистки сточной воды с активным илом необходимо выполнение следующих условий количество органических веществ 300-1200 мг/л,температура воды–15-35°С, ХПК/БПК < 1,5, концентрация взвешенных веществ не более 100 мг/л Таким образом, в классификацию сточных вод должна входить также информация о том, в каких условиях реализуются те или иные методы очистки. И, наконец, в системе классификации должны быть учтены условия возможной реализации некоторой комбинации методов очистки (МО), например если в сточной воде содержатся ПАВ и их концентрация превышает 50 мг/л, то до процесса осаждения необходимо снизить их концентрацию или же заменить осаждение другим подходящим методом, который позволит снизить содержание ПАВ взвешенных веществ до требуемых значений

Таким образом, для классификации сточных вод необходима информация, которая должна быть представлена в определенной форме Весь объем информации, характеризующей объект исследования, называют «базой знаний» Чем больший объем информации содержится в базе знаний и чем логичнее она сформирована, тем более точно оценивается состояние сточной воды, поступающей на очистку

Показатели, характеризующие состояние сточной воды (состав, концентрация, температура, плотность и т д), необходимо сгруппировать и затем оформить их соотношения (табл 5 1, 5 2)

Таблица 5 1 Группировка показателей сточных вод

Наименование показателей сточной воды	Условные обозначения	Группировка показателей			
		1	2	3	4
Плотный осадок	$C_{пл}$	+	(+)		
Сухой осадок	$C_{сух}$		(+)	+	
Прокаленный осадок	$C_{пр}$			(+)	+
Концентрация взвешенных веществ	$C_{вз}$	+	(+)		
Концентрация ПАВ	$C_{ПАВ}$		+	(+)	
Концентрация нефтепродуктов	$C_{неф}$		+		
Содержание фосфора	$C_{фос}$			+	
Общее содержание азота	$C_{аз}$			+	
Активность среды	pH				+
Химическое потребление кислорода	ХПК			+	
Полное биохимическое потребление кислорода	$БПК_{полн}$			+	
Температура	T, °С	+	(+)	(+)	(+)
Плотность	ρ	+	(+)	(+)	(+)

Группировка сточных вод в табл 5 1 проведена по фазо-дисперсной характеристике Так, к первой группе отнесены показатели, характеризующие плотный осадок ($C_{пл}$) и концентрацию взвешенных веществ ($C_{вз}$) (в таблице это отмечено плюсами) Случаи пересечения классов показателей отмечены плюсами в скобках

В табл 5 2 перечислены виды соотношений и признаки, по которым эти соотношения относят к тому или иному виду

Данные, необходимые для разработки системы классификации, получают из книг, инструкций, документов, материалов конкретных исследований, из описания совокупности всех необходимых знаний сделанного каким-либо специалистом-экспертом, путем использования специальных опросников с последующей их обработкой, а также интервьюирования специалистов (причем характер задаваемых вопросов определяется не только общим планом интервью, но и характером получаемых от специалистов ответов); путем режима «мозгового» штурма (в специально созданной стимулирующей обстановке эксперты спонтанно генерируют информацию, которая затем обрабатывается), путем использования методов статистического распознавания образов для накопления знаний и статистической обработки экспериментально полученной информации Полученные сведения должны быть систематизированы и представлены в удобной форме

Таблица 5 2 Соотношение некоторых показателей сточных вод

Вид соотношения	Правила соотношений
(БПК/ХПК) < 0,5	Есть примеси биохимически трудноокисляемые и неокисляемые
(БПК/ХПК) ≥ 0,5	Все примеси биохимически окисляемые
$C_{орг} \approx (C_{сух} - C_{пр})$	Есть органические примеси, растворимые в воде
$C_{вз} \approx (C_{пл} - C_{сух})$	Есть грубодисперсные взвешенные вещества
($C_{вз}$/ХПК) < 1	Растворимых примесей больше, чем нерастворимых
($C_{вз}$/ХПК) > 1	Растворимых веществ меньше, чем нерастворимых
($C_{сух}/C_{пр}$) < 1	В сточной воде растворимые примеси преимущественно минерального характера
($C_{сух}/C_{пр}$) > 1	В сточной воде растворены преимущественно органические примеси
($C_{вз}/C_{сух}$) < 1	Растворимых примесей больше, чем нерастворимых
($C_{вз}/C_{сух}$) > 1	Растворимых примесей меньше, чем нерастворимых

Сформируем базу знаний системы классификации сточных вод по концентрации примесей Для этого необходимо

1) определить показатели, участвующие в процедуре классификации,

2) разбить эти показатели на определенные интервалы,

3) подобрать соответствующие методы очистки, обеспечивающие извлечение загрязнений из стоков, характеризующихся такими показателями,

4) определить требуемую глубину очистки стоков

Далее приступают к формированию базы знаний

Сформулируем задачу классификации сточных вод.

Дано:

$p = \{P_1, P_2, \ldots, P_i\}$ – множество независимых свойств объекта (методов очистки нейтрализация, коагуляция, биологическая очистка и т.д),

M признаков, характеризующих объекты (концентрация, состав, pH и т д),

$Q_m = \{q_{m1}, q_{m2}, \ldots, q_{mn}\}$ – множество возможных значений m-го признака, причем n – число этих значений;

$A = \{ Q_1 * Q_2 * Q_3 * \ldots * Q_M \}$ – множество всех гипотетически возможных состояний объекта исследования, при этом состояние $a_i \in A$ характеризуется вектором $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \ldots, a_{iM})$, где $a_{im} \in Q_m$, $m = \overline{1,M}$.

Требуется:

На основании знаний эксперта для каждого состояния из множества A идентифицировать наличие соответствующих свойств (методов очистки) из множества P и тем самым построить классификацию множества $A = \bigcup_{l=0}^{L} K_l$, такую, что состояние $a_i \in A$ относится к классу K_l, если объект в этом состоянии обладает свойством P_l.

К классу K_0 относятся такие состояния, в которых объект не обладает ни одним из рассматриваемых свойств

Исходя из особенностей очистки сточных вод как объекта исследования, поставленную задачу можно конкретизировать

1 Если объект исследования в каждом состоянии $a_i \in A$ (определяется особенностями формирования сточных вод) может обладать несколькими свойствами из множества P_l (физико-химическое, биохимическое), то результатом классификации будет покрытие множества A (состояний) подмножествами классов $K_0, K_1, \ldots, K_L$

2 Если объект исследования в каждом состоянии $Q_i \in A$ может обладать только одним из свойств множества P, то результатом классификации должно быть разбиение множества A на $L+1$ классов

При структуризации задачи классификации используется гипотеза о различной степени характерности отдельных значений каждого признака для каждого свойства или, что то же самое, для всего класса Формально это можно описать следующим образом Упорядочение знаний признака Q_m по их характерности для свойства P_l позволяет ввести на Q_m транзитивное и антирефлексное бинарное соотношение (линейный порядок) r_m^l, определяемое следующим образом $(q_{ms}, q_{mt}) \in r_m^l$, если значение q_{ms} более характерно для свойства P_l, чем значение q_{mt}.

На основе этих соотношений можно построить бинарные соотношения доминирования по характерности для каждого свойства на множестве со-

стояний объекта исследования, которые определяются следующим образом

$$R^l = \{(a_{,}, a_t) \in A \times A \mid \forall m = \overline{1,M}, (a_{tm}, a_{sm}) \in r_m^l \; u \; \exists m_0 \; 1 \le m_0 \le m,$$

такое что $(a_{sm0}, a_{t\,m0}) \in r_m^l$, $l = \overline{1,L}$.

Естественно предположить, что если по некоторому состоянию эксперт определяет наличие у объекта какого-то свойства, то и состояние, описываемое набором признаков, не менее характерных для этого свойства, также обладает этим свойством, т.е. если $a_s \in K_l$ и $(a_t, a_s) \in R_l$, то $a_t \in K_l$.

Отсюда следует, что если в некотором состоянии объект исследования не обладает каким-то свойством, то этим свойством не обладают и менее характерные для него состояния, т.е. если $a_s \notin K_l$ и $(a_t, a_s) \in R_l$, то $a_t \in K_l$

Используя изложенное выше, разобьем Q_m-признак (пусть, например, это концентрация) на подмножество: $Q_m = \{q_{m1}, q_{m2}, q_{m3}, q_{m4}\}$, где q_{m1} – слабо концентрированные, q_{m2} – концентрированные, q_{m3} – сильно концентрированные, q_{m4} – очень концентрированные. Каждое из элементов подмножества q_{mi} разобьем, соответственно, на подмножества, например $q_{m1} = \{\xi_{m11}, \xi_{m12}, \xi_{m13}\}$, где ξ_{m11} – низко слабо концентрированные, ξ_{m12} – средне слабо концентрированные, ξ_{m13} – высоко слабо концентрированные Предположим, что по каждому признаку эксперт может упорядочить его значения по их характерности для соответствующего метода очистки из имеющегося набора (табл 5 3)

Таблица 5 3. Классификация показателей ХПК для различных методов очистки

Метод Очистки	Показатель ХПК											
	класс											
	1			2			3			4		
	подкласс											
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Нейтрализация	1	1	2	2	3	3	-	-	-	-	-	-
Коагуляция	1	1	1	1	2	2	3	3	-	-	-	-
Биологическая	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	-	-

Примечание 1 – проводит очистку, 2 – слабая очистка, 3 – затруднительно ответить (или не проводит очистку)

Из таблицы видно, что «нейтрализация» обеспечивает очистку стоков классов ξ_{11} - ξ_{12}, когуляция – стоков классов ξ_{11} ,ξ_{12}, ξ_{13}, ξ_{21}, а биологический метод – то же, что и коагуляция плюс классы ξ_{22} , ξ_{23}

Подбирая таким образом к каждому признаку (концентрация, состав, pH и т д) соответствующее свойство (метод очистки), можно сформировать базу знаний Естественно, база знаний должна формироваться по всем признакам (по фазо-дисперсным характеристикам, по химическому составу и т д), т е предполагается построение базы знаний по модульному принципу (рис 5 1)

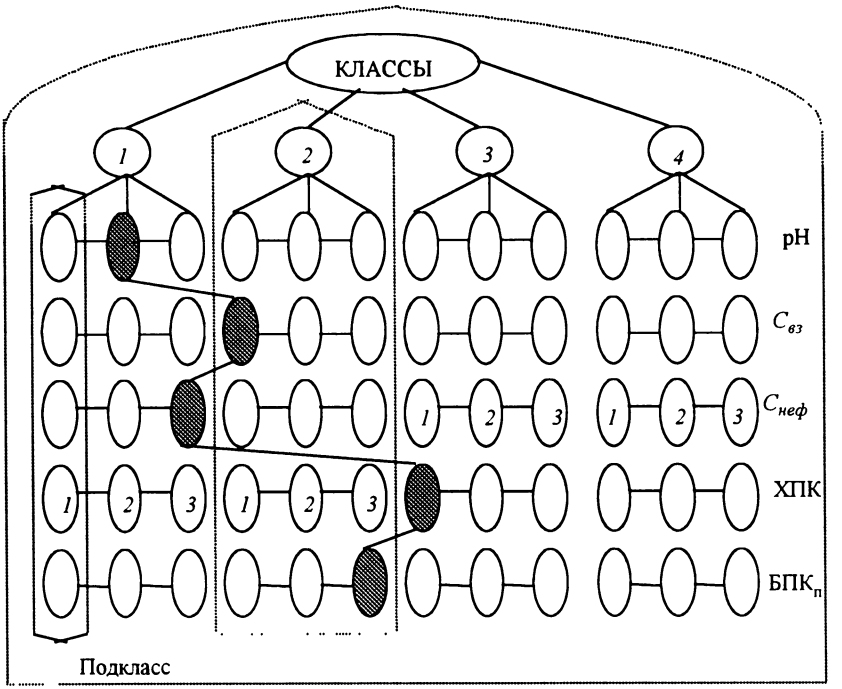


Рис 5 1 База знаний по признакам сточных вод

Допустим, что сточные воды определяются вектором $X_i(t) = x_{i1}(t)$, $x_{i2}(t)$, , $x_{i5}(t)$, тогда для подклассов, обозначенных темными овалами, будут характерны следующие показатели очистки стоков. ХПК→(3(1)), $БПК_{полн}$→(2(3)), $C_{неф}$→(1(3)); $C_{вз}$→2(1(1)); pH→(1(2)) Эти показатели относятся к сильно концентрированным стокам, для очистки которых требуются методы осаждения, коагуляции и биологическая очистка

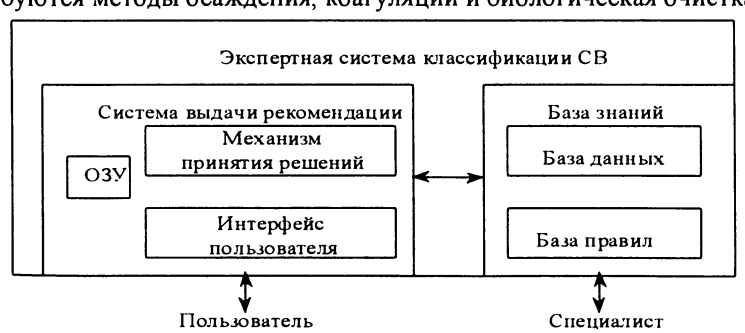


Рис 5 2 Экспертная система классификации сточных вод

Разрабатываемая система классификации может использоваться при проектировании оптимальных схем водоочистки, особенно она может быть полезна как экспертная система (рис. 5 2) Ее также можно использовать при управлении технологическими схемами водоочистки, в этом случае она представляет собой элемент прогноза системы управления

Техническая структура системы классификации сточных вод состоит из четырех программных подсистем (рис 5.3). по фазо-дисперсным характеристикам примесей, их концентрации, химическому составу и свойствам Каждая из этих подсистем состоит из классов и подклассов

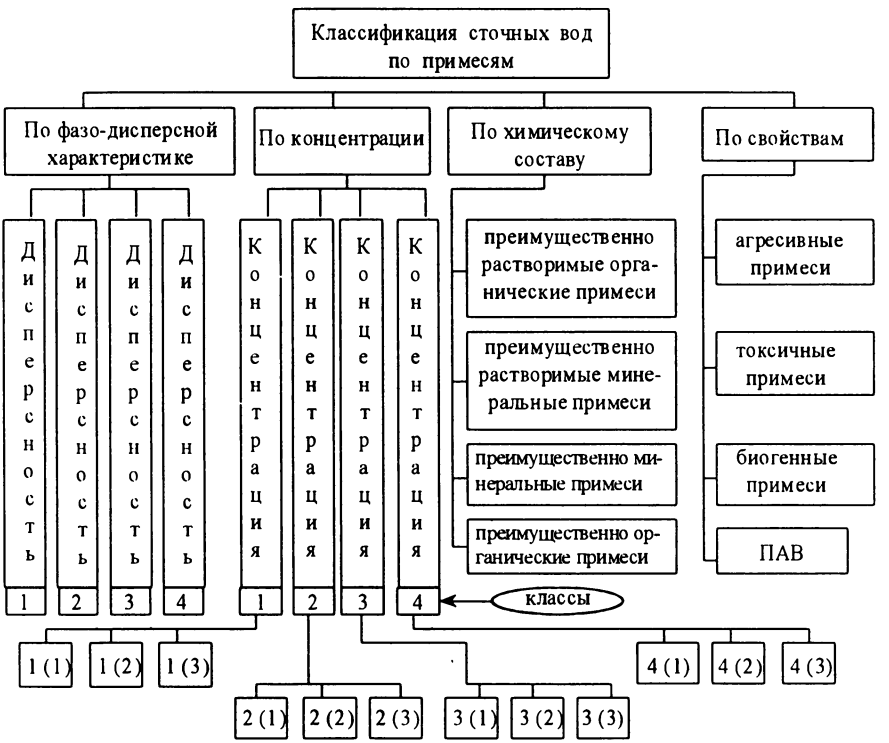


Рис 5 3 Структура классификации сточных вод

Рассмотрим (рис 5 4), как работает алгоритм классификации сточных вод.

После ввода исходных данных и формирования векторов задается цель – допустим, «провести классификацию по фазо-дисперсной характеристике примесей» Затем извлекаются показатель сточной воды и «правило», определяется соответствие цели правилу «ЕСЛИ-ТО» Часть правила «ЕСЛИ» называется посылкой, а часть правила «ТО» – выводом или действием

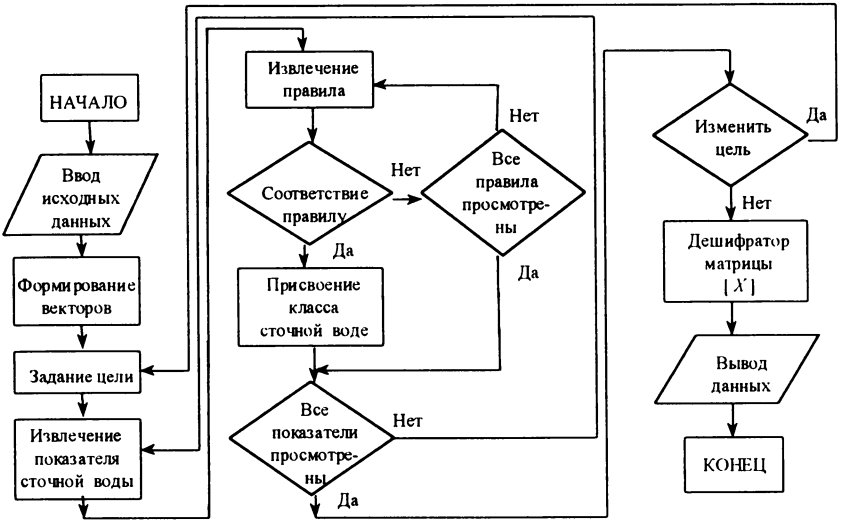


Рис 5 4 Алгоритм классификации сточных вод

Рассмотрим правило

ЕСЛИ $Y(h(X_{ij})) \to X(A_1)$
ТО в сточной воде есть примеси $X(B)$, (5 1)

где Y, X – переменные, h – посылка, X_{ij} – значение элемента вектора, например, ХПК

Итак, при выполнении условия (5 1) производится запись результатов в матрицу «классификация» $[X_k]$ следующим образом

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \textit{если выполняется условие} \ (5\ 1) \\ 0, & \textit{в противном случае} \end{cases}$$

После выборки показателей «по фазо-дисперсной характеристике» переходят к другим показателям и результаты выводят на печать

На основе рассмотренной системы «классификации сточных вод» в будущем можно будет разработать экспертные системы При этом данная система будет представлять собой продукционную систему (рис 5 5) Таким образом, разработанная система «классификации сточных вод» может быть использована при проектировании (в том числе при автоматизированном управлении системами очистки сточных вод), а также в экспертных системах

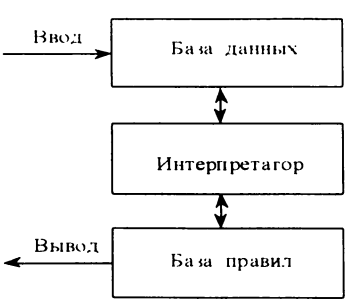


Рис 5 5 Продукционная система

5.2. Алгоритм выборки метода очистки по системе классификации сточных вод

Рассмотрим основные направления при разработке алгоритмов классификации сточных вод по фазо-дисперсным характеристикам примесей (их концентрации, химическому составу и свойствам) Основным звеном в системе классификации сточных вод является модуль «классификация по фазо-дисперсной характеристике примесей» Остановимся подробнее на разработке алгоритма системы классификации по этому признаку

Все примеси, содержащиеся в воде, можно разделить на четыре группы 1) взвеси в виде тонкодисперсных суспензий и эмульсий 10^{-2}-10^{-4}мм, 2) коллоиды и высокомолекулярные соединения 10^{-4}-10^{-6}мм, 3) газы и органические вещества, растворенные в воде 10^{-6}-10^{-7}мм, 4) соли, кислоты, основания 10^{-7}-10^{-8}мм

Очистку сточных вод с примесями первой группы осуществляют методами, основанными на действии сил гравитации и адгезии Для очистки сточных вод второй группы используют коагуляционный метод, основанный на введении в очищаемую воду электролитов, на изменении состава и концентрации дисперсной фазы и т д Примеси третьей группы извлекают из воды путем аэрирования, окисления и адсорбции И, наконец, примеси четвертой группы удаляют из воды, переводя ионы в малорастворимые и слабо диссоциированные соединения с использованием соответствующих реагентов

Исходя из этого, можно сделать следующие обобщения

1) классификационные признаки обусловлены фазо-дисперсным состоянием примеси в воде,

2) каждой примеси соответствует некоторая совокупность способов ее выделения,

3) можно изменить фазо-дисперсные свойства примесей, изменяя физико-химические факторы среды (pH, солевой состав, температура и т д)

Сущность работы алгоритма классификации сточных вод по фазо-дисперсным характеристикам заключается в том, что предварительно формируется вектор $C(k)$ из числа показателей (табл 5 1), затем проводится анализ элементов данного вектора по правилу «ЕСЛИ-ТО» Результаты классификации заносятся в первую строку матрицы классификации $[X]$ по правилу (5 1) Алгоритм работает в диалоговом режиме и одновременно производит контроль данных вводимых пользователем

Алгоритм классификации сточных вод по концентрации примесей заключается в том, что предварительно формируется вектор $Q(k)$, затем каждый элемент этого вектора сравнивается с элементами эталонных векторов, которые находятся в матрице $[X_1]$ В процессе этого анализа результаты классификации заносятся в матрицу $[X]$ При этом результаты группировки значений каждого признака (показателя) заносятся в свою, предназначенную только для данного признака, строку (соответствующий элемент x_{ij} матрицы $[X]$) Анализ исходного рабочего вектора с эталонным вектором проводится по правилу «ЕСЛИ-ТО» (правило 5 1)

При разработке алгоритма классификации сточных вод по химическому составу учитываются органические и неорганические примеси Каж-

дый из этих видов делится в свою очередь на две подгруппы растворимые и нерастворимые примеси

Согласно алгоритму, после ввода исходных данных формируется вектор $Q_3(k)$, состоящий из показателей, рассмотренных в табл 5 2 Затем проводится анализ элементов вектора $Q_3(k)$ и результаты заносятся в матрицу $[X]$

Анализ выполняется по следующему правилу·

ЕСЛИ $(C_{сух}/C_{пр}) < 1$,
ТО в СВ содержатся растворимые примеси преимущественно минерального характера

При разработке алгоритма классификации сточных вод по свойству примесей учитывались такие факторы, как содержание ПАВ, токсичных, биохимически трудно окисляемых, неокисляемых веществ, соединений фосфора и азота.

Работа данного алгоритма аналогична работе предыдущего Предварительно формируется вектор $Q_4(k)$, каждый его элемент сравнивают по правилу «ЕСЛИ-ТО» и результат заносят в матрицу $[X]$

Пример

ЕСЛИ $(ХПК/БПК) > 1{,}5$,
ТО в СВ содержатся биохимически трудно окисляемые и неокисляемые примеси

Таким образом, предлагаемая система классификации учитывает ряд основных показателей сточных вод Основным достоинством этой системы является то, что она может быть использована при автоматизированном проектировании.

5.3. Выбор методов очистки и их взаимного расположения в технологической схеме водоочистки

Процедуре синтеза технологической схемы водоочистки должна предшествовать процедура выбора методов очистки и их взаимного расположения между собой Работа инженера при проектировании систем очистки сточных вод сводится к задаче выбора наиболее эффективного метода очистки из всего многообразия самих методов и их сочетаний Этот процесс относительно легко поддается автоматизации, если формализовать мыслительную деятельность проектировщика и представить ее в виде системы аксиом и логики высказываний

Используя принципы работы экспертных систем, знания которых представляются в виде продукции, была предложена процедура выбора методов очистки по алгоритму, представленному на рис 5 6 При этом под продукцией понимается выражение

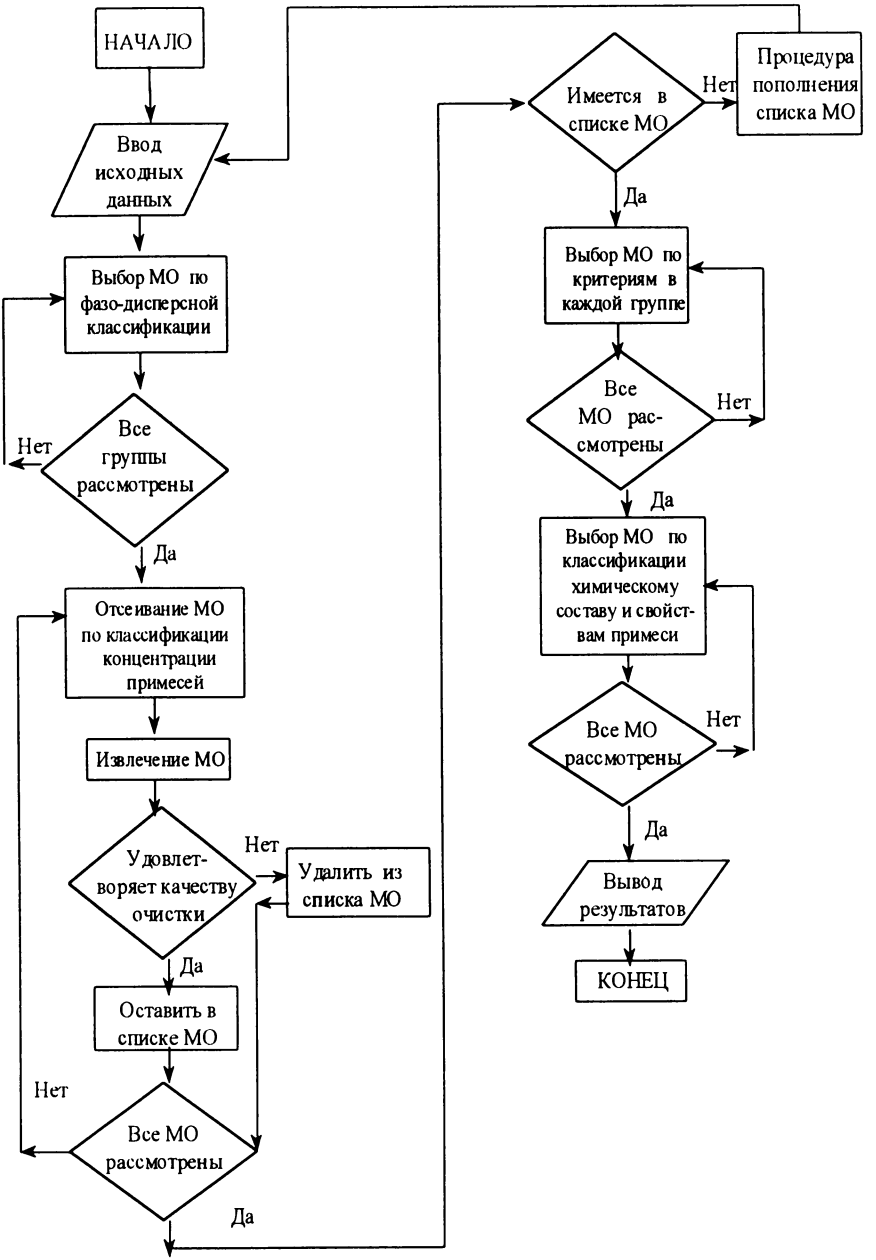


Рис 5 6 Алгоритм выборки методов очистки (МО)

$$(J), Q, P, A \rightarrow B, N$$

здесь J – имя продукции, Q – характеризует сферу применения продукции A,B – ядро продукции, P – условие применимости ядра продукции, N – описывает постусловие продукции

В соответствии с этим алгоритмом (см рис 5 6), после ввода данных производится первый этап выбора методов очистки (МО) по фазодисперсной классификации по правилу

ЕСЛИ в СВ имеются примеси i-й группы,
ТО в матрице МО все методы очистки,
находящиеся в i-м столбце,
будут участвовать в процедуре выбора МО

Пусть в сточных водах имеются примеси первого класса (грубодисперсные взвешенные вещества) Из табл 5 4 видно, что эти примеси можно удалить следующими методами осаждение, скорые фильтры, медленные фильтры Из этих трех методов выбираем те, которые способны удалить примеси или обеспечить нужное качество очистки сточных вод с концентрацией $C_{вз} = K(k)$, где K – класс, k – подкласс При этом возможны варианты очистки сточных вод $K(k)$ класса могут обеспечить 1) несколько методов, 2) лишь один метод, 3) не может обеспечить ни один из методов

Если результатом выбора окажется первая или вторая ситуация, продолжают проверку выбранных методов очистки по классификации концентрации примесей по химическому составу и по свойствам примеси Проверку производят так же, как по фазо-дисперсной классификации Оставшиеся методы, которые удовлетворяют процессу очистки стоков заданного $K(k)$-класса, сравнивают по критериям и результаты выводят на печать

Если же результатом выбора окажется третья ситуация, то нужно возвратиться назад, к началу процедуры (см рис 5 6) и пополнить список методов очистки либо принять дополнительные меры Для этого нужно провести анализ, чтобы установить, по каким причинам не удовлетворяется условие очистки и устранить эти причины К примеру, после проверки условий осаждения оказалось, что оно не обеспечивает требуемой глубины очистки из-за наличия в сточных водах больших количеств ПАВ В этом случае до процесса осаждения необходимо провести озонирование, либо адсорбцию активированным углем и т д Это позволит удалить ПАВ или снизить его концентрацию и создать благоприятные условия для процесса осаждения

Допустим, после выбора методов очистки оказалось, что для удаления загрязнений из сточных вод класса K(k) требуется провести очистку методами, относящимися к четырем группам из первой группы – О (осаждение), из второй группы – К3 (коагуляция сульфатом алюминия с последующим осаждением) и К4 (коагуляция сульфатом алюминия с последующим фильтрованием); из третьей группы – Б1 (биологическая с активным илом), из четвертой группы – Н1 (нейтрализация известью с после-

Таблица 5 4. Группировка методов очистки сточных вод по их фазо-дисперсной классификации

Методы очистки	Обозначение методов очистки	Класс			
		1	2	3	4
Осаждение	О	+			
Скорые фильтры	Ф1	+			
Медленные фильтры	Ф2	+	(+)		
Разбавление	Р1	+	+	+	+
Нейтрализация известью, осаждение	Н1	(+)	(+)		+
Нейтрализация известью, фильтрование	Н2	(+)	(+)		+
Нейтрализация содой	Н3				+
Нейтрализация комбинированными реагентами, осаждение	Н4	(+)	(+)		+
Нейтрализация комбинированными реагентами, фильтрование	Н5	(+)	(+)		+
Нейтрализация кислотой	Н6				+
Коагуляция известью, осаждение	К1	(+)	+		
Коагуляция известью с ускоренным фильтрованием	К2	(+)	+		
Коагуляция сульфатом алюминия, осаждение	К3	(+)	+		
Коагуляция сульфатом алюминия, фильтрование	К4	(+)	+		
Коагуляция хлоридом железа, осаждение	К5	(+)	+		
Коагуляция хлоридом железа, фильтрование	К6	(+)	+		
Коагуляция комбинированными реагентами, осаждение	К7	(+)	+		
Коагуляция комбинированными реагентами, фильтрование	К8	(+)	+		
Биологическая с активным илом	Б1	(+)	+		
Аэрация	А1			+	(+)
Озонирование	АА			+	(+)
Адсорбция на активированном угле	АД			+	(+)
Хлорирование	Х			+	

дующим осаждением) и Н2 (нейтрализация известью с последующим фильтрованием). Тогда (согласно табл 5 4) вектор выбора методов очистки будет иметь вид

$$X_{14}(k) = (1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1)$$

Вектор $X_{14}(k)$ указывает лишь на то, что для очистки стоков класса $K(k)$ необходимо выбрать определенные методы, однако этого недостаточно, т к очень важно знать расположение этих методов друг относительно друга

В технологии водоочистки соблюдается определенная последовательность (цепочка) в применении различных методов очистки. Как правило, после физико-механической очистки (удаляются грубодисперсные вещества) переходят к физико-химическим методам (нейтрализация, коагуляция и др), а затем – к биологическим. Иногда эта последовательность может нарушаться. Тогда проводят дополнительные мероприятия, как это рассматривалось выше В целом каждый из методов очистки имеет свое место и назначение в технологической структуре, и его применение зависит от конкретных условий

Рассмотрим алгоритм определения местоположения методов очистки в технологической системе водоочистки (рис 5 7)

После ввода исходных данных, имея вектор метода очистки X_{14}, извлекают из него последовательно методы очистки и сравнивают их с целью, где цель – это запрос вида. «Данному методу очистки соответствует порядковый номер N» При совпадении извлеченного метода очистки с целью ему присваивается очередной порядковый номер В противном случае из вектора извлекают другой метод и т д , пока не будет достигнуто совпадение метода с целью. Как только совпадение будет найдено, методу

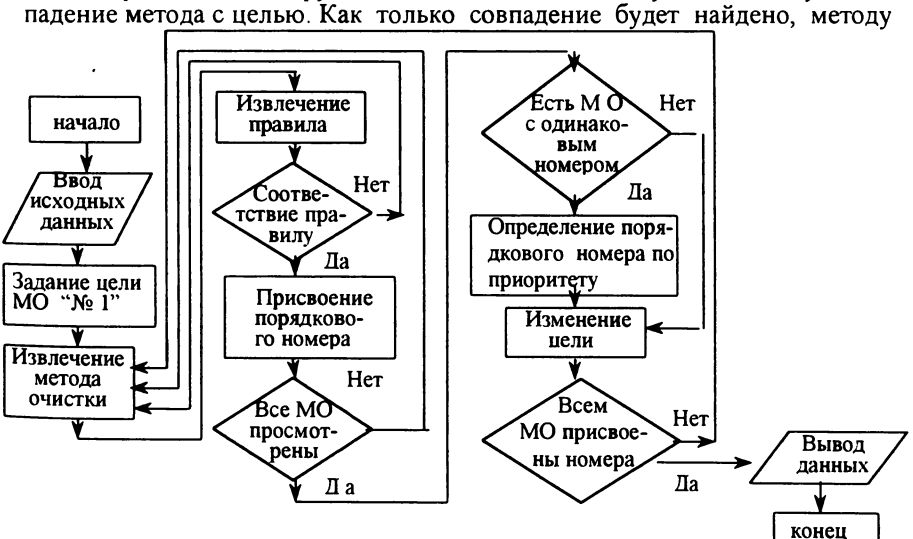


Рис.5.7. Алгоритм определения местоположения метода очистки в технологической системе водоочистки

очистки присваивают необходимый номер и возвращаются к позиции, где имело место первое несовпадение метода очистки с целью Затем определяют, все ли методы рассмотрены, после чего проверяют, имеются ли методы очистки с одинаковыми присвоенными номерами Если такое наблюдается, то номер метода очистки уточняется по приоритету и методу присваивается уточненный номер После этого изменяется цель Завершается работа алгоритма проверкой пункта «всем ли методам очистки присвоены номера» и выводом их на печать.

Необходимо отметить, что база знаний местоположения методов очистки сформирована так, что число целей в ней соответствует числу методов очистки

Рассмотрим отдельно правила проведения процедуры установления местоположения метода очистки

1 Процесс осаждения осуществляется после процесса фильтрации

ПРАВИЛО $N_o < N_{фi}$,
ТО ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРАВИЛА N_o $N_{тк}$,

где N_o – порядковый номер процесса осаждения, $N_{фi}$ – порядковый номер процесса фильтрации, $N_{тк}$ – текущий порядковый номер

2 Процесс осаждения проводят до физико-механической и биологической очистки сточных вод

ПРАВИЛО $N_o < (N_{фi}, N_{нi}, N_{кi}, N_{бi})$.

3 Процесс нейтрализации проводится сразу после механической очистки, в случае когда сточные воды кислые или щелочные

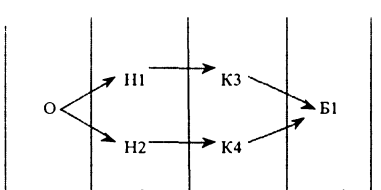
ПРАВИЛО $C_{pH} > 7{,}5$ *или* $C_{pH} > 6$,
ТО $(N_{pi}, N_o, N_{фi}) < N_{нi} < (N_{кi}, N_{бi})$.

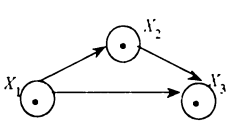
Результат работы рассмотренного алгоритма с примером вектора очистки X_{14} имеет вид

$$X_{14}(k) = (1,0,0,0,2,2,0,2,2,2,0,2,3,3,0,0,3,3,0,0,4,4,0,0)$$

Графически это показано на рис 5 8

Теперь установим возможные сочетания методов очистки сточных вод в виде графов отношений, который представляет собой ориентированный граф G (X,A) (рис 5 9), где X – множество вершин $X_1, X_2, X_3, \ldots X_n$ (методы





A

	1	2	3
1	0	1	1
2	0	0	1
3	0	0	0

Рис 5 8 Упорядочение методов очистки
Рис 5 9 Ориентированный граф и его матрица смежности

очистки), A – множество ребер $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_m$ (связи между методами очистки)

Граф отношений в виде матрицы смежности $A(G) = (a_{ij})$ (рис 5 10) определяется следующим образом

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \textit{если в } G \textit{ существует дуга}(x_i, x_j) \\ 0, & \textit{в противном случае.} \end{cases}$$

Матрица смежности в нашем случае будет иметь размерность (6×6), так как число вершин соответствует числу методов очистки в списке X_{14}

Покажем, как получить матрицу смежности для графа соотношений. Извлечем первый метод очистки из списка X_{14} – это процесс осаждения. Затем определим последовательность методов очистки (рис. 5.8) и соединим вершины графов (рис 5.10*а*, 5 10*б*).

Четвертый метод очистки в списке – метод К3. Определим условия проведения этого метода очистки по табл 5 5, в которой перечислены показатели рассматриваемой сточной воды и их значения.

Очевидно, что коагуляцию можно проводить при pH = 6-7,5; в нашем случае после процесса осаждения pH сточной воды равен 9,0 Значит, мы не можем сочленить процессы «О» и «К3». Точно так же не могут быть сочленены процессы «О» и «К4».

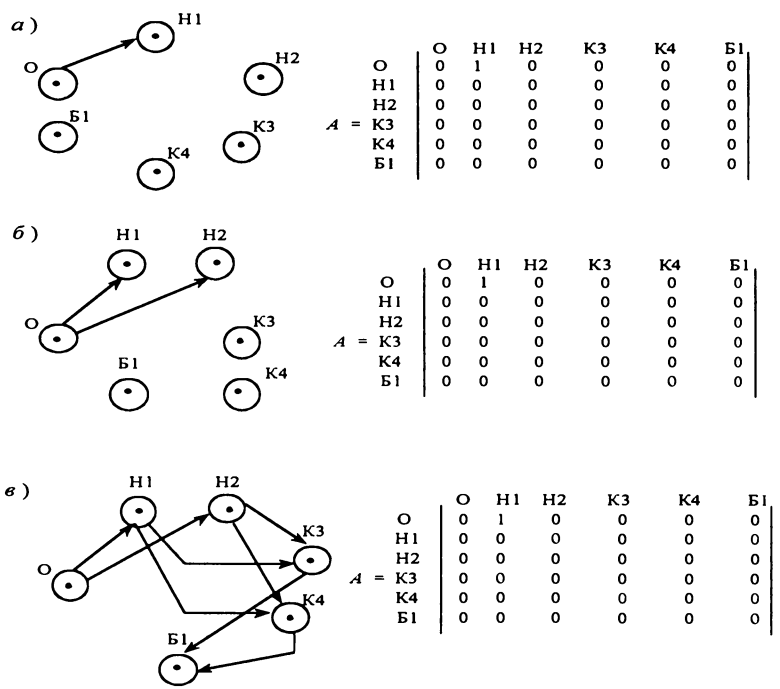


Рис 5 10 Построение графа отношений

Таблица 5 5. Значения показателей методов очистки сточных вод

Показатели сточных вод	Значение показателя		
	до осаждения	после осаждения	до коагуляции
pH среды	9	9	6-7,5
ХПК, мг/л	300	240	500
$БПК_{полн}$, мг/л	150	135	280
$C_{вз}$, мг/л	200	110	150

Определив таким образом возможные сочетания процесса «О» с другими методами (рис. 5.10*б*), переходим к поиску возможных сочленений остальных методов.

Значение показателей сточных вод после каждого процесса очистки определяем по формуле:

$$C_j^{пос} = C_j^{до} - \frac{C_j^{до} \cdot ЭФ_j}{100},$$

где $C_j^{пос}$ – концентрация j-го показателя сточных вод после очистки; $C_j^{до}$ – концентрация j-го показателя сточных вод до очистки, $ЭФ_j$ – эффективность i-го процесса по j-ому показателю

Результат возможных сочетаний методов очистки сточных вод K-класса в виде графов отношений и матрицы смежности $A(G)$ показаны на рис 5 10*в*

Далее приступают к формированию технологических структур схем водоочистки.

5.4. Формирование технологической схемы очистки

Формирование технологической схемы очистки сточных вод K- класса начнем с того, что граф отношений (рис. 5.10*в*) представим в виде дерева, по методике приведенной ниже.

Метод заключается в следующем. Определяются все возможные пути на графе от исходной вершины до заключительной, в нашем случае – от вершины, соответствующей процессу «О», до вершины, определяющей процесс «Б1», которым заканчивается очистка сточных вод Имея матрицу смежности и граф соотношений (см рис 5 9. и 5.10), можно построить полную матрицу путем нахождения матрицы $\|a_{ij}\|$, здесь a_{ij} – число путей из вершины i к вершине j, которое определяют, используя определители-квазиминоры,

$$a_{kl} = \left| a_{ij} \to lk \right|_{kl}, \quad i = 1,.\ ,n\ ,\ \ j = 1,..\ ,m.$$

Выражение $\left| a_{ij} \to lk \right|_{kl}$ называют квазиминором элемента a_{lk} в матрице $\|a_{ij}\|$. Выражение $\left| a_{ij} \to lk \right|_{kl}$ указывает на матрицу с вычеркнутой строкой и столбцом, которая вписывается в символ квазиминора подобно матрице, вписываемой в символ обычного минора; запись $\left|\ \right|_{kl}$ является символом квазиминора.

Расчет исходного квазиминора можно свести к разложению на квазиминоры меньшего порядка

$$\left|a_{ij} \to lk\right|_{kl} = \sum\nolimits_n a_{nm} A_{nm}^{(l)},$$

где $A_{nm}^{(l)} = 1$ при $m = l$ и $A_{nm}^{(l)} = \left|a_{ij} \to mm \to lk\right|_{ml}$ при $m \neq l$

Пусть матрица непосредственных путей имеет вид (5 2) для графа на рис 5 11

$$\left\|a_{ij}\right\| = \begin{Vmatrix} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \\ & & & a_{24} & a_{25} \\ & & & & a_{35} \\ & & a_{43} & & a_{45} \\ a_{51} & & & & \end{Vmatrix} \qquad (5\ 2)$$

Требуется определить возможные пути от вершины 1 к вершине 5 и подсчитать их число Для этого в матрице (5 2) вычеркивается столбец с номером 1 (соответствует номеру начальной вершины) и строка с номе-

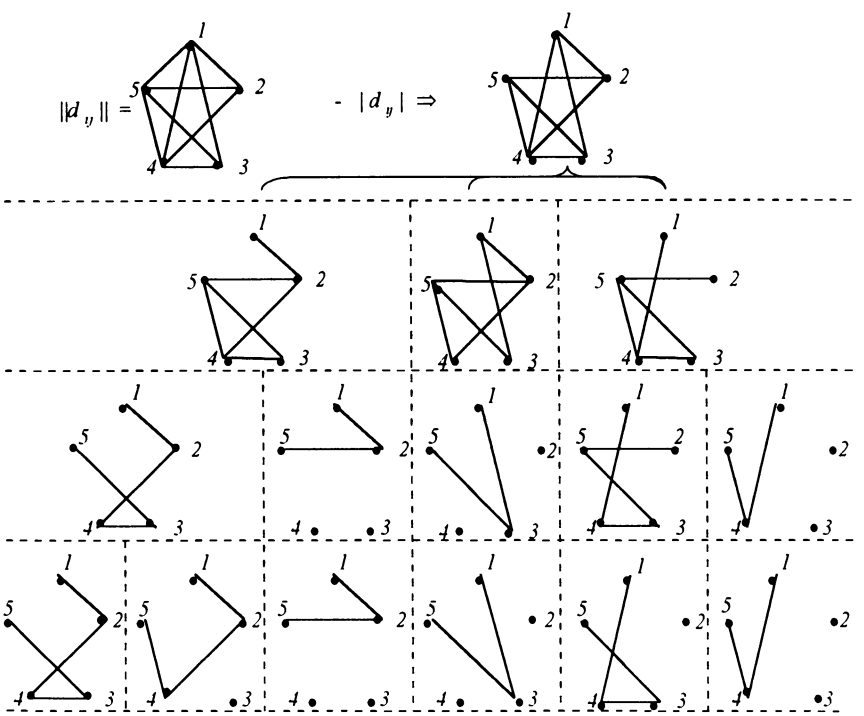


Рис 5 11 Этапы раскалывания графа

ром 5 (соответствует номеру конечной вершины) Получим квазиминор вида (5 3), который определяет возможные пути от вершины 1 к вершине 5 и количество этих путей

$$\left|a_{ij\to 51}\right|_{15} = \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} & a_{14} & \\ & & a_{24} & a_{25} \\ & & & a_{35} \\ & a_{43} & & a_{45} \end{vmatrix} \qquad (5\ 3)$$

Продолжая разложение (5 3) до тех пор, пока в нем останутся лишь миноры первого порядка, окончательно получим

$$|a_{ij}\to 51|_{15} = a_{12}a_{21}a_{43}a_{35}+a_{12}a_{24}a_{45}+a_{12}a_{25} + a_{13}a_{35}+a_{14}a_{43}a_{35}+a_{14}a_{45}.$$

Процесс соответствующего поэтапного "раскалывания" графа" показан на рис 5 11

Используя предлагаемую методику для графа отношений (рис 5 10*в*), можно получить пути от вершины «О» к вершине «Б1» Число этих путей равно четырем, а сами пути представляют собой варианты технологической структуры очистки сточных вод *К*-класса (рис 5.12)

Описанная методика синтеза вариантов технологической схемы очистки сточных вод полностью отражена в алгоритме, (рис 5 13)

Этот алгоритм предусматривает также выбор оптимального варианта технологической схемы водоочистки Для полной реализации этого алгоритма необходимо разработать критерий оценки эффективности схемы водоочистки

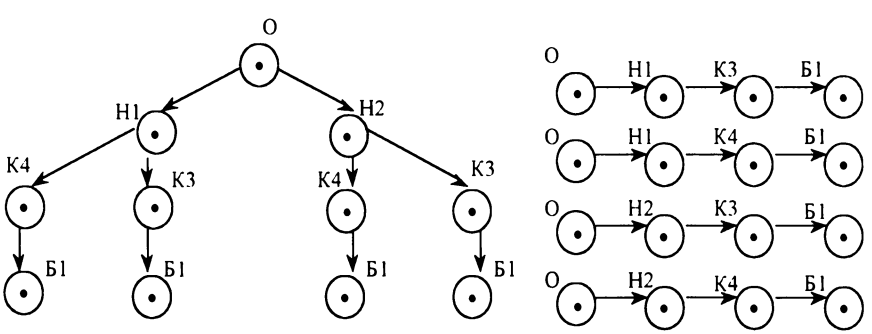


Рис 5 12 Технологические схемы для обработки сточной воды *k*-го класса

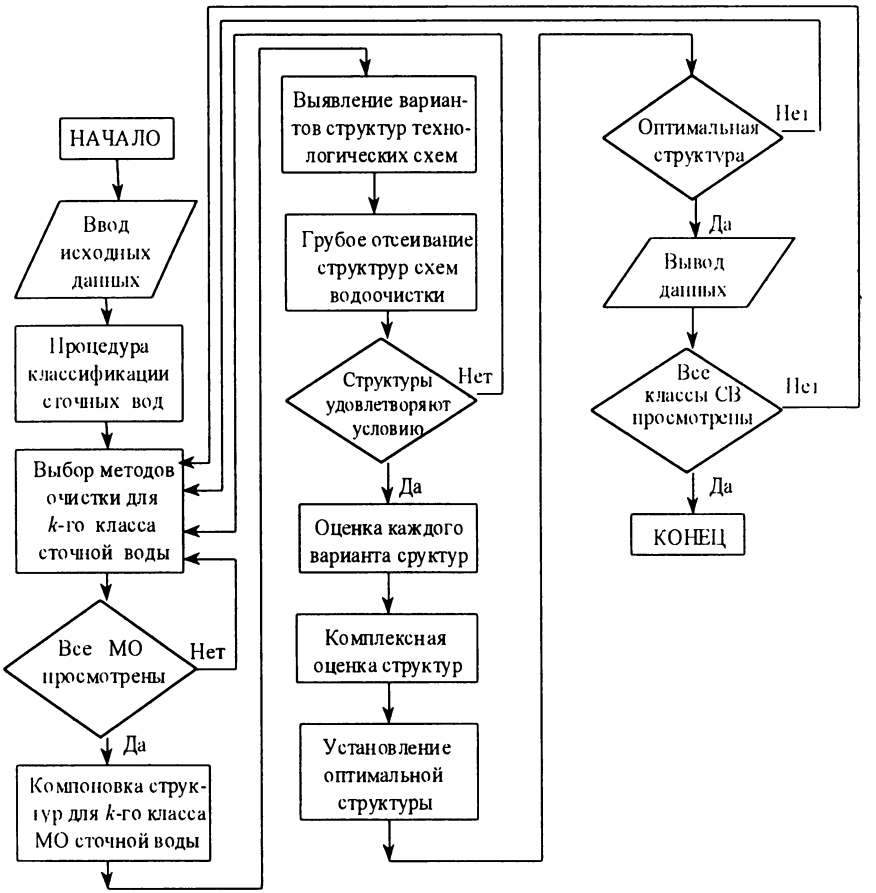


Рис 5 13 Алгоритм формирования структуры схемы водоочистки

5.5. Критерий оценки выбора оптимальной схемы очистки

Чтобы из множества возможных вариантов выбрать оптимальную схему водоочистки, необходимо четко определить критерии оценки ее эффективности Для этого был предложен критерий оптимизации П, минимизирующий затраты на очистку сточных вод

$$П = \min П_i = \min(C_i + E_H K_i), \quad i = 1,...,N_i, \qquad (5\ 4)$$

где C_i – себестоимость очистки сточных вод по i-й схеме. K_i – капитальные затраты на i-ю схему. $E_н = 0,15$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений

Каждая i-я схема состоит из j способов очистки; тогда

$$C_i = \sum_{j=1}^{n} C_{ij}; \qquad K_i = \sum_{j=1}^{n} K_{ij}, \qquad j = 1,\ldots, n, \tag{5.5}$$

где C_{ij} – себестоимость очистки j-го способа очистки по i-й схеме; K_{ij} – капитальные затраты на j-й способ очистки по i-й схеме.

В свою очередь в каждом j-м способе очистки используется m агрегатов, тогда:

$$C_{ij} = \sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{M} C_{ijm}; \qquad K_{ij} = \sum_{j=1}^{n}\sum_{m=1}^{M} K_{ijm},$$

где $i=1, \ldots, N$; $j=1,\ldots,n$; $m=1, \ldots, M$; C_{ijm}, K_{ijm} – соответственно себестоимость и капитальные затраты m-го агрегата, j-го способа очистки, i-й схемы.

По каждой i-й схеме задаются ограничения:

$$P_{iz} \le P_{z\,\text{зад}}; \qquad i = 1,\ldots,N; \quad z = 1,\ldots,Z, \tag{5.7}$$

где z – число нормированных показателей в очищаемом потоке (БПК, ХПК, ПАВ, фосфаты и т.д.).

Используя критерий (5.4) с ограничениями (5.7), можно выбрать оптимальный вариант схемы водоочистки. Особенностью этого критерия является то, что себестоимость очистки сточных вод определяется по каждой схеме с учетом затрат на метод очистки, обслуживание каждого агрегата и аппарата. Ограничениями являются степень очистки по нескольким показателям: $БПК_{полн}$, ХПК, фосфаты и т.д.

Слабым местом этого критерия является то, что в нем не учитываются такие параметры как «устойчивость» системы к колебаниям сточных вод по составу, содержанию и расходу и «безопасность» системы, т.е. не делается оценка влияния системы на окружающую среду.

Исходя из этого, предлагается производить оценку каждого варианта технологических структур по критерию, включающему три большие группы: «затраты» $h(x_1)$, «устойчивость» $h(x_2)$ и «безопасность» $h(x_3)$.

$$\begin{aligned} h(x_1) &= \min(h(x_{11}), h(x_{12})); \\ h(x_2) &= \min(h(x_{21}), h(x_{22}), h(x_{23}), h(x_{24}), h(x_{25})); \\ h(x_3) &= \min(h(x_{31}), h(x_{32})). \end{aligned} \tag{5.8}$$

Затраты $h(x_1)$ включают в себя капитальные затраты на строительство $h(x_{11})$ и эксплуатационные затраты $h(x_{12})$. Они могут быть определены по соотношениям (5.4)-(5.7).

Устойчивость $h(x_2)$ оценивается по следующим составляющим: $h(x_{21})$ – устойчивость системы к количеству поступающей воды; $h(x_{22})$ – устойчивость системы к изменениям качества поступающей воды; $h(x_{23})$ – устойчивость системы к загрязнениям в поступающей воде; $h(x_{24})$ – надежность системы; $h(x_{25})$ – технологичность схемы.

Безопасность $h(x_3)$ включает в себя оценку системы по создаваемым опасностям $h(x_{31})$ и оценку системы по влиянию на окружающую среду $h(x_{32})$.

Предполагается (см систему уравнений 5 8), что максимум устойчивости схемы очистки вод к всевозможным колебаниям загрязнений и максимум безопасности окружающей среды будут оцениваться минимумом показателей $h(x_2)$ и $h(x_3)$; другими словами, 100 %-ная устойчивость соответствует «нулю»

Комплексная оценка заключается в распределении весовых коэффициентов между затратами, устойчивостью и безопасностью с учетом конкретных условий Здесь в качестве взвешенно-комплексного способа используется способ, предложенный Л Фаном, заключающийся в распределении весовых коэффициентов среди подмножества посылок в том случае, когда имеются порождающие правила следующего вида

ЕСЛИ приемлемы затраты $h(x_1)$, достаточно высока устойчивость системы $h(x_2)$ и достаточно высока безопасность системы $h(x_3)$,

ТО данный вариант структурной схемы водоочистки можно принять за оптимальный и приступить к детальной его проработке

Рассмотрим оценку значимости посылок $\{h(x_1), h(x_2), h(x_3)\}$. При этом в каждом подмножестве Q посылок $x = \{x_1, x_2, x_3\}$ распределим монотонно уменьшающиеся весовые коэффициенты $q(Q)$ следующим образом

1) $q(0) = 0, \quad q(x) = 1;$
2) если $\forall Q1.\ Q2.\ Q1 \subseteq Q2$, тогда $q(Q1) \le q(Q2)$.

При этом общая оценка значимости $E(x)$ задается в виде

$$E(x) = \max(\min(h(x_i)) \wedge q(F), \quad F \in P(x), \quad x_i \in P$$

где $P(x)$ – множество подмножеств, образованных их элементов x

Для оценки посылки правила обычно находят минимальное значение каждой оценки значимости Этому способу присущи также недостатки из-за того, что слишком занижается общая оценка, а при отсутствии хотя бы одной составляющей оценки значимости общая оценка вообще не проводится Однако, благодаря распределению относительных весов среди подмножества, эту информацию можно эффективно использовать

Таким образом, критерий (5 4) с ограничениями (5 7) позволяет выбрать оптимальный вариант схемы водоочистки с точки зрения затрат, а критерий (5 8) – с учетом «затрат», «устойчивости» и «безопасности» Для успешного использования этих критериев необходимы математические описания процессов очистки сточных вод в аппаратах, что позволило бы получать не только качественные, но и количественные характеристики показателей систем очистки, необходимые для их проектирования

5.6. Многоуровневый метод синтеза оптимальных схем биологической очистки сточных вод

Важным этапом развиваемой стратегии повышения эффективности биологической очистки сточных вод (БОСВ) является решение задач оптимизации ее структуры и режимов работы От эффективности (сходимости, быстродействия, надежности полученного решения) используемых для решения задач подходов, алгоритмов и методов зависят как сроки проектирования вновь создаваемых установок, так и своевременность принятия технических решений

Ниже дано описание разработанного математического аппарата для решения задач моделирования и структурно-параметрической оптимизации биотехнологических систем

5.6.1. Формализация задачи синтеза

Задача синтеза биотехнологических и химико-технологических систем ставится следующим образом

Пусть известны исходные вещества X и вещества Y, которые требуется получить, а также имеется набор из N основных аппаратов (будем называть их блоками) Требуется выбрать и соединить N $\left(N \le \overline{N}\right)$ основных блоков и определить режимы их работы таким образом, чтобы получить заданные количества целевых продуктов Y При этом некоторый критерий должен получить оптимальное (минимальное или максимальное) значение

Для формализации задачи синтеза необходимо сформулировать математическую модель глобальной технологической схемы, критерий оптимизации и ограничения на переменные

Математическая модель глобальной технологической схемы состоит из совокупности математических моделей отдельных блоков и математической модели структуры глобальной химико-технологической системы (ХТС) Пусть гиперструктура состоит из $\overline{N}$ блоков $\left(N \le \overline{N}\right)$, где N - число блоков, входящих в оптимальную схему, причем k-й блок ($k = \overline{1, N}$) имеет M_k входных, L_k выходных потоков и r_k управляющих переменных Будем считать, что все входные x_i^k ($i = \overline{1, M_k}$) и выходные y_j^k ($j = \overline{1, L_k}$) потоки имеют одинаковую размерность n и включают одни и те же переменные Если в некотором потоке имеются не все переменные, то отсутствующие формально считаются равными нулю Обозначим через $x^k = \left(x_1^k, \ldots, x_{M_k}^k\right)$

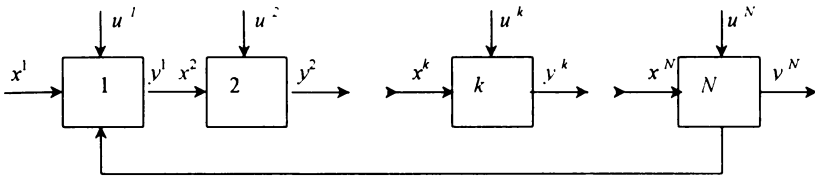


Рис 5 14 Блок-схема оптимальной технологической системы

$y^k = \left(y_1^k, \ldots, y_{L_k}^k \right)$ – вектор переменных выходных потоков k-го блока размерности $l_k = nL_k$, $u^k = \left(u_1^k, \ldots, u_{r_k}^k \right)$ – вектор управляющих переменных Переменные векторов x^k, y^k, характеризующие состояние входных и выходных потоков k-го блока и включающие концентрации компонент, температуру (или энтальпию), давление и расход потока, называются переменными состояния или фазовыми переменными Переменные u^k содержат конструктивные и технологические параметры, изменения которых влияют на режим работы k-го блока (рис.5 14)

Математическая модель k-го блока может быть записана в виде

$$y^k = \varphi^k \left(x^k, u^k \right), \; k = \overline{1, N} \qquad (5\,9)$$

Задание аналитической зависимости выходных переменных от входных и управляющих переменных не обязательно в явной форме Предполагается, что имеется алгоритм, позволяющий по известным входным и управляющим переменным вычислить значения выходных переменных k-го блока

Вид математической модели структуры глобальной технологической системы зависит от типа используемых структурных параметров Различают структурные параметры двух типов Одни параметры соответствуют потокам, а другие – блокам Структурный параметр α_{jk}, $(0 \le \alpha_{jk} \le 1)$ первого рода соответствует возможному потоку, связывающему k-й и j-й блок Параметры α_{jk}, являются непрерывными переменными Структурный параметр второго рода δ_k соответствует k-му блоку и является двоичной переменной

$$\delta_k = \begin{cases} 0, \text{если } k \text{ – й блок входит в ХТС,} \\ 1, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

Число структурных параметров 2-го рода равно N

Общий прием построения глобальной схемы с использованием структурных параметров первого рода состоит в следующем На входе и выходе каждого k-го блока устанавливаются, соответственно, смеситель и делитель потоков (рис 5 15), а выходные потоки из каждого делителя подаются

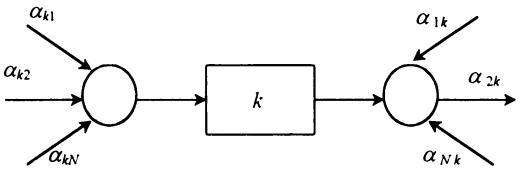


Рис 5 15 Вход и выход k-го блока

на входы некоторых блоков Для простоты рассуждений мы будем предполагать, что выходные потоки из каждого блока подаются на все остальные блоки Таким образом, число потоков, а, следовательно, и структурных параметров равно N^2

Математическая модель глобальной ХТС с использованием структурных параметров первого рода запишется в виде следующих соотношений связи

$$x^k = \sum_{j=1}^{N} y^J \alpha_{kj}, \; k = \overline{1,N}, \tag{5 10}$$

$$\sum_{j=1}^{N} \alpha_{jk} = 1, \; k = \overline{1,N}, \tag{5 11}$$

где α_{jk} – структурный параметр, соответствующий возможному потоку, связывающему k-й и j-й блоки ($\alpha_{jk} = \{1,0\}$)

Уравнения (5 10) и (5 11) являются соответственно уравнениями материального баланса смесителя и делителя потоков

Отметим, что потоки в ХТС можно разделить на три группы – входные, выходные, промежуточные Входной поток подается извне в один из блоков ХТС, выходной поток выходит из блока и выводится из схемы, промежуточный поток выходит из одного блока и подается в другой блок Переменные, характеризующие входные, выходные, промежуточные потоки, будем называть входными, выходными, промежуточными переменными схемы, соответственно Входные переменные схемы формально ничем не отличаются от управляющих переменных, и далее будем считать входные переменные блока, являющиеся входными переменными схемы, управляющими переменными этого блока

Для нормальной работы технологического объекта выходные, промежуточные и управляющие переменные схемы должны удовлетворять некоторым технологическим и конструктивным ограничениям, записанным в виде уравнений материального и теплового балансов

$$\begin{aligned} \psi_i\left(x^k, u^k\right) &= 0,\ i = \overline{1, m_1}, \\ h_j\left(x^k, u^k\right) &\le 0,\ j = \overline{1, m_2}, \end{aligned} \qquad (5\ 12)$$

где x^k, u^k – векторы входных и управляющих переменных k-го блока

Или в векторной форме

$$\begin{aligned} \psi(x,u) &= 0, \\ h(x,u) &\le 0, \end{aligned} \qquad (5\ 13)$$

где ψ, h - вектор-функции размерности m_1, m_2 соответственно

Критерий оптимальности синтезируемой ХТС (для определенности – приведенные затраты) обычно является функцией, зависящей от переменных состояния и управляющих переменных В общем случае он имеет вид

$$F(x,u) = \sum_{k=1}^{N} F^k\left(x^k, u^k\right), \qquad (5\ 14)$$

где F^k – часть критерия, относящаяся к k-му блоку

Задача синтеза заключается в минимизации функции F

$$\begin{aligned} \psi\ (x, u) &= 0, \\ h\ (x, u) &\le 0, \end{aligned} \qquad (5\ 15)$$

при ограничениях (5 9) – (5.12)

Здесь G^0 – множество всех возможных вариантов схем включенных в гиперструктуру, α – вектор дискретных структурных параметров, принадлежащих множеству G^0 и характеризующих наличие взаимосвязей между блоками синтезируемой схемы, U- область допустимых значений независимых непрерывных переменных блоков схемы, u – вектор независимых непрерывных переменных (управляющих переменных и непрерывных структурных параметров), принадлежащих множеству U

5.6.2. Анализ подходов при решении задачи синтеза

Подходы к решению задачи синтеза

Анализ задачи поиска оптимальной технологической схемы (5 9) – (5 12) с использованием интегрально-гипотетического принципа показывает, что она является задачей смешанной дискретно-непрерывной оптимизации

Существует *два подхода* к ее решению, которые, по сути, являются модификациями метода погружений Сущность метода состоит в том, что первоначальную задачу заменяют более общей При этом решение общей задачи является решением и первоначальной задачи На этом принципе построен метод динамического программирования В ряде работ приведе-

но решение задачи оптимального синтеза системы БОСВ с применением метода динамического программирования

При первом подходе из гиперструктуры последовательно генерируют (вычленяют) некоторые конечные схемы, которые далее оптимизируют по непрерывным параметрам u В этом случае задача синтеза может быть записана в виде

$$\min_{\alpha \in G^0} \min_{u \in U} F(\alpha, u) \qquad (5\ 15)$$

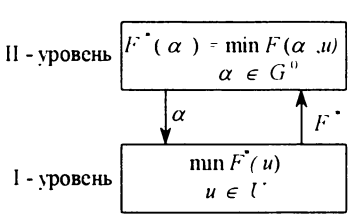
Эта задача может рассматриваться как двухуровневая (рис 5 16), верхним уровнем которой является дискретная оптимизация структуры схемы, а нижним - параметрическая оптимизация аппаратов при заданной структуре схемы

При таком подходе требуется полный перебор вариантов схем, который является исключительно трудоемкой процедурой по вычислительным и временным затратам Решение задач синтеза возможно лишь при небольшом числе вариантов схем

При втором подходе решение задачи синтеза проводится при одновременном изменении как дискретных, так и непрерывных параметров Задача в этом случае запишется в виде

$$\min_{\alpha \in G^0, u \in U} F(\alpha, u)$$

В этом методе, получившим название «метод структурных параметров», предлагается замена дискретной задачи синтеза на непрерывную путем снятия ограничений на дискретность поисковых структурных параметров Полученные в результате решения задачи нелинейного программирования значения структурных параметров округляются до 0 либо 1 Для округления параметров, не лежащих близко к этим значениям, предлагается использовать инженерные или технологические соображения Однако такие рекомендации могут быть даны не всегда Следует иметь в виду, что найденные простым округлением параметры не гарантируют оптимальность полученного решения



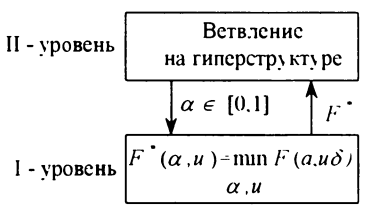


Рис 5 16 Двухуровневая процедура синтеза при первом подходе
Рис 5 17 Двухуровневая процедура синтеза при втором подходе

Модификация метода структурных параметров была предложена Г Островским Метод синтеза основан на совместном применении метода структурных параметров и метода ветвей и границ Ветвление на гиперструктуре и одновременная оптимизация по структурным и управляющим переменным позволяют оценивать верхние и нижние границы и отсекать неперспективные направления ветвления

Для ее решения (рис 5 17) может быть использован двухуровневый метод На верхнем уровне проводится ветвление на гиперструктуре по некоторым структурным параметрам, принимающим дискретные значения, на нижнем – оптимизация по непрерывным структурным и управляющим переменным, которая позволяет оценить перспективность данного ветвления по полученным верхней и нижней границам

Подходы к решению задачи оптимизации

Для оценки оптимальности синтезируемых систем проводится параметрическая оптимизация с использованием методов нелинейного программирования

Задача оптимизации химико-технологических процессов эквивалентна задаче оптимизации некоторой целевой функции (критерия)

$$\min_{u} F(u)$$

при выполнении ограничений

$$\psi_i\left(x^k, u^k\right) = 0,\ i = \overline{1, m_1},$$

$$h_j\left(x^k, u^k\right) \le 0,\ j = \overline{1, m_2},$$

где u – вектор поисковых переменных размерности r

В работе Г Островского выделены следующие особенности вычисления критерия в задачах оптимизации ХТС

1 Расчет функции сводится к расчету стационарного режима ХТС при фиксированных значениях варьируемых параметров

2 Наличие в схеме аппаратов с распределенными параметрами (каталитические реакторы с неподвижным или «кипящим» слоем катализатора) приводит к необходимости интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений при расчете таких аппаратов

3 В ХТС часто имеются аппараты (реакторы с мешалками, ректификационные колонны, экстракторы и др), расчет которых сводится к выполнению трудоемких итерационных процедур

4 Наличие в схеме рециклов и тепловых обратных связей приводит к тому, что при сведении материального и теплового балансов возникает необходимость в итерационной процедуре на уровне расчета ХТС

5 Схема может характеризоваться несколькими сотнями фазовых и несколькими десятками управляющих переменных

Таким образом, задача оптимизации технологических схем чрезвычайно сложна, имеет большую размерность, требует огромного числа операций даже для одного расчета значения критерия Следовательно, чтобы решение реальных задач оптимизации схем могло быть выполнено в приемлемые сроки, необходимо использовать самые эффективные методы оптимизации

Одним из направлений решения задачи с ограничениями (условной минимизации) является сведение ее к последовательности задач без ограничений (безусловной минимизации) с помощью различных методов, строящих вспомогательную целевую функцию – модифицированный критерий Сведение общей задачи минимизации к последовательности задач безусловной минимизации представляется перспективным вследствие того, что для решения задач на безусловный экстремум разработан ряд эффективных, быстросходящихся методов

Большинство методов безусловной минимизации предусматривает построение последовательности $\{p^i\}$, $i=0,1,\ldots$, направлений движения к минимуму $F(u)$ Основное отличие одного метода от другого заключается в способе построения направления В общем случае вектор направления p^i является некоторой явной функцией точки u^i, предыдущих точек $\left(N \le \overline{N}\right)$ векторов градиентов $g^i, g^{i-1}, \ldots$ минимизируемой функции F, матриц $F(x,u)=\sum_{k=1}^{N} F^k\left(x^k,u^k\right)$ ее вторых производных (Гессе), вычисленных в точках $u^i, u^{i-1}, \ldots$, т е

$$p^i = p^i\left(u^i, u^{i-1}, \ldots, g^i, g^{i-1}, \ldots; G^i, G^{i-1}, \ldots\right)$$

В зависимости от максимального порядка производных, входящих в выражение для вычисления вектора направления, алгоритмы минимизации относятся соответственно к методам нулевого, первого и второго порядков

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что целесообразно использовать методы первого и второго порядков во всех случаях, когда это возможно

Классический метод Ньютона соответствует выбору обратной матрицы Якоби $H^i = \left(G^i\right)^{-1}$ Основной недостаток метода Ньютона – использование вторых производных минимизируемой функции, получение которых в реальных задачах чрезвычайно трудоемко

Этого недостатка лишены методы переменной метрики или квазиньютоновские, не требующие вычисления матрицы Гессе, и в то же время использующие свойства квадратичной аппроксимации минимизируемой

функции Используемые сопряженные направления поиска обеспечивают сходимость задачи минимизации квадратичной функции за r шагов, причем после r-го шага находят матрицу, обратную к матрице Гессе

Разработан ряд рекуррентных соотношений, уточняющих матрицу Гессе на каждом шаге минимизации Численный эксперимент, проведенный на модельных примерах и тестовых задачах, показал, что наиболее эффективным (в смысле минимального числа расчетов минимизируемой функции) является алгоритм Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шенно (BFGS)

$$G^{i+1} = G^i + \left(1 + \frac{y^{iT} G^i y^i}{s^{iT} y^i}\right) \frac{s^i s^{iT}}{s^{iT} y^i} - \frac{s^i y^{iT} G^i + G^i y^i s^{iT}}{s^{iT} y^i}$$

где G^i - оценка матрицы, обратной к матрице Гессе, полученной на i-м шаге, $s^i = u^{i+1} - u^i = \alpha^i p^i, y^i = g^{i+1} - g^i$.

Класс эффективных численных методов последовательной безусловной минимизации, обеспечивающих геометрическую и квадратичную скорости сходимости, создан на базе использования модифицированных функций Лагранжа Он позволяет решать многие практические задачи с достаточной точностью и быстродействием

Модифицированный критерий строится путем добавления к функции Лагранжа штрафных слагаемых, чаще всего он имеет вид

$$\Phi(u, \lambda, \tau) = F(u) + \sum_{i=1}^{m_1} \mu_i \psi_i(u) + \sum_{j=1}^{m_2} \nu_j h_j(u) + \sum_{i=1}^{m_1} \gamma_i \psi_i^2(u) + \sum_{j=1}^{m_2} \beta_j \theta_j\left(h_j(u)\right),$$

где $\lambda=\{\mu_i, \nu_i\}$ – совокупность множителей Лагранжа, $\tau=\{\gamma_i, \beta_i\}$ – совокупность коэффициентов штрафа, $\theta_i=0$, если $h_j(u)\le 0$ и $\theta_i=h^2$, если $h_j(u)>0$

Теоретическими исследованиями доказана сходимость метода со скоростью геометрической прогрессии, знаменатель которой может быть сделан сколь угодно малым за счет достаточно большого коэффициента штрафа

Подходы к решению задачи расчета стационарного режима

На каждом шаге оптимизации для оценки критерия оптимальности и ограничений проводится многократный расчет материального и теплового балансов технологической системы Такая задача часто называется расчетом стационарного режима ХТС, или расчетом ХТС, и заключается в определении всех переменных x^k, ($k = \overline{1, N}$) из уравнений (5 9)–(5 11) Перепишем (5 10) с учетом (5 9)

$$x^k - \sum_{j=1}^{N} \varphi^j\left(x^j, u^j\right)\alpha_{kj} = 0, \quad k = \overline{1, N} \qquad (5\ 16)$$

Поскольку модели блоков (5 9) в общем случае описываются нелинейными уравнениями, то задача расчета ХТС сводится к решению системы нелинейных уравнений (5 9)–(5 11) или эквивалентной ей системы (5 16) размерности $M = \sum_{k=1}^{N} m_k$

Систему (5 16) можно записать в следующем общем виде

$$f(x,u) \equiv x - \varphi(x,u) = 0, \qquad (5\ 17)$$

где x - вектор совокупности входных переменных всех блоков схемы размерности M, u - вектор совокупности управляющих переменных всех блоков размерности $r = \sum_{k=1}^{N} r_k$.

f, φ - вектор-функции размерности M

Сложность математических описаний аппаратов ХТС, включающих модели с сосредоточенными и распределенными параметрами, а также наличие материальных и тепловых рециклов предъявляют высокие требования к скорости сходимости и вычислительной устойчивости разрабатываемых методов

Методы расчета схем делятся на два больших класса – модульный и подход, ориентированный на уравнения Модульный подход является более универсальным В настоящее время наибольшее распространение получил модульный последовательный направленный метод расчета

Он требует предварительного определения порядка расчета аппаратов схемы В схеме выделяются комплексы – совокупности аппаратов, охваченных обратными связями Внутри каждого комплекса определяется оптимальная, с точки зрения какого-либо критерия, совокупность итерируемых переменных, т е математическая модель (5 17) распадается на ряд независимых подсистем меньшей размерности, каждая из которых может рассчитываться независимо, если их решать в определенной последовательности Эти задачи можно решить, используя алгоритмы структурного анализа, позволяющие определить совокупность входных потоков, разрыв которых делает схему разомкнутой Сумма размерностей векторов переменных этих потоков удовлетворяет соотношению $\overline{m} \le m \le M$, где $\overline{m}$ – минимально возможная сумма размерностей разрываемых потоков, при которой схема становится разомкнутой Расчет схемы сводится к решению системы m нелинейных уравнений относительно m неизвестных компонент вектора

$$f(x) \equiv x - \varphi(x) = 0, \qquad (5\ 18)$$

где x – вектор разрываемых потоков размерности m, f, φ – вектор-функции размерности m

В качестве *критерия выбора итерируемых переменных* принимают 1) минимальное число разрываемых потоков, 2) минимальную суммарную параметричность разрываемых потоков, 3) минимальный радиус спектра собственных значений матрицы частных производных решаемой системы На практике получили распространение первый и второй критерии Второй критерий обеспечивает минимальную размерность решаемой системы Как правило, в моделирующих программах параметричность всех потоков технологической схемы принимается одинаковой, и, следовательно, в качестве критерия выбора итерируемых переменных принимают первый критерий – минимальное число разрываемых потоков

Обычно итерационный процесс решения системы (5 18) строится по формулам

$$y^i = \varphi\left(x^i\right),$$
$$x^{i+1} = x^i + G\left(y^i - x^i\right),$$

где i - номер итерации, y - вектор размерности m, G - матрица ускорения размерности $m \times m$

Самым простым в реализации является метод простой итерации Существует ряд способов ускорения сходимости простой итерации Все они строятся из предположения, что в окрестности решения система уравнений может быть линеаризована

В методе Ньютона и квазиньютоновских методах последовательные приближения вычисляются по формуле

$$x^{i+1} = x^i + t^i p^i, \qquad (5\ 19)$$

где вектор p^i размерности m определяет направление движения из точки x^i. t^i – скаляр, определяющий длину шага вдоль направления p^i

Вектор p^i определяется по формуле

$$p^i = -\left(J^i\right)^{-1} f\left(x^i\right), \qquad (5\ 20)$$

где J^i – матрица Якоби векторной функции $f(x^i)$ системы (5 18) размерности $m \times m$

В методе Ньютона на каждой итерации необходима разностная аппроксимация и обращение матрицы Якоби, что требует многократного расчета разомкнутой схемы, и поэтому он редко используется при расчете схем

Идея квазиньютоновских методов впервые была предложена в работе Бройдена, где матрица Якоби (или обратная к ней H^i) вычисляется разностным способом на первом направлении, а в дальнейшем по рекуррентным соотношениям происходит только ее уточнение по информации, по-

лученной на предыдущих шагах итерационного процесса

$$H^{i+1} = H^i + \frac{\left(s^i - H^i y^i\right) s^{iT} H^i}{s^{iT} H^i y^i}, \qquad (5\ 21)$$

$$y^i = f\left(x^{i+1}\right) - f\left(x^i\right), \quad s^i = x^{i+1} - x^i.$$

Среди множества разработанных квазиньютоновских методов, использующих различные рекуррентные соотношения для оценки матрицы Якоби или обратной к ней, следует отметить предложенный Г Островским квазиньютоновский метод (QNM), обладающий (m+1)-м свойством линейного окончания. В методе QNM для уточнения матрицы H^{i+1} используются рекуррентные соотношения

$$H^{i+1} = H^i + \frac{\left(s^i - H^i y^i\right) c^{iT} E^i}{c^{iT} E^i y^i}, \; H^0 = R_m, \qquad (5\ 22)$$

$$E^{i+1} = E^i + \frac{E^i y^i c^{iT} E^i}{c^{iT} E^i y^i}, \; E^0 = I_m, \qquad (5\ 23)$$

где R_m - произвольная матрица размерности $m \times m$, c^i - вектор произвольны x постоянных размерности m

Квазиньютоновские методы являются мощным средством решения задач расчета стационарных режимов и широко распространены на практике *Одним из недостатков методов является необходимость хорошего начального приближения*, поскольку именно в этом случае квазиньютоновские методы обладают сверхлинейной скоростью сходимости

Отметим, что эффективность и сходимость любого метода расчета схем будет зависеть от характера решаемой задачи С целью экономии машинного времени при математическом моделировании технологических схем необходим предварительный выбор наиболее эффективного метода

5.6.3. Многоуровневая процедура решения задачи синтеза

Проведенный анализ и рассмотренные подходы и методы синтеза, оптимизации и расчета биотехнологических систем показывают, что при применении гиперструктур в решении задачи синтеза для оценки оптимальности синтезируемых систем используются методы нелинейного программирования, в частности, последовательной безусловной минимизации. На каждом шаге оптимизации для оценки критерия проводится расчет стационарного режима технологической схемы, который сводится к решению системы, в общем случае, нелинейных уравнений Использование последовательного модульного подхода для расчета стационарного

режима требует проведения структурного анализа, т е выбора особых потоков, разрыв которых приводит замкнутую систему к условно разомкнутому виду, и определения последовательности расчета аппаратов При расчете стационарного режима выполняется многократный расчет математических моделей аппаратов схемы

Как видно, методы оптимального синтеза, основанные на интегрально-гипотетическом подходе, представляют собой *многоуровневую процедуру* Под *многоуровневой*, будем понимать вычислительную процедуру, которая характеризуется следующим

– имеется больше, чем один уровень (будем считать, что они нумеруются снизу вверх),

– каждому уровню соответствует своя итерационная процедура,

– на i-м итерационном шаге l-го уровня проводится полная итерационная процедура (l-1)-го уровня

Таким образом, метод синтеза включает следующие уровни (рис 5 18) *Нулевым уровнем* является расчет отдельного аппарата системы, *первым уровнем* – расчет стационарного режима, *вторым* – безусловная оптимизация модифицированного критерия, *третьим* – изменение параметров модифицированного критерия, *четвертым* – структурный анализ схемы, *пятым* – ветвление на гиперструктуре

Рассмотренные уровни решения задачи синтеза – это вложенные процедуры типа «цикл в цикле», причем внешним циклом является пятый уровень, а внутренним – нулевой

На каждом уровне могут применяться свои эффективные методы, в частности рассмотренные выше

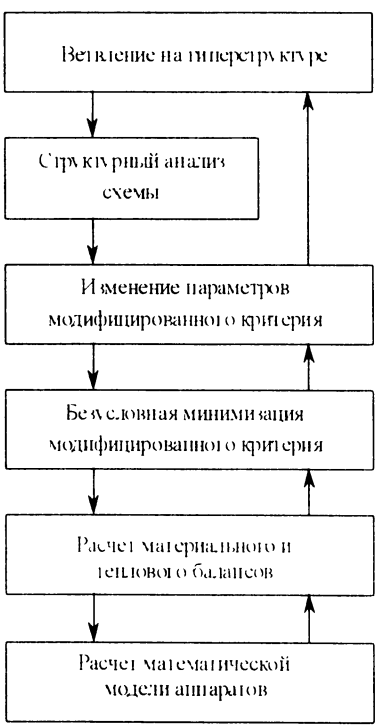


Рис 5 18 Многоуровневая процедура решения задачи синтеза

Однако простое их объединение, пусть даже самых совершенных, приводит к неэффективной работе многоуровневого метода в целом Алгоритмы всех уровней должны быть тщательно согласованы друг с другом, и рассматриваться как единый алгоритм. Оценку эффективности алгоритма каждого уровня необходимо проводить с позиций всего алгоритма в целом.

5.6.4. Разработка метода синтеза

Сначала сравним два подхода к синтезу биотехнологических систем в зависимости от используемых при построении глобальной схемы структурных параметров, а затем предложим метод, использующий оба типа структурных параметров

Синтез с использованием структурных параметров первого рода

Перепишем постановку задачи синтеза (5 9)–(5 12), (5 14), (5 15), в которой использованы структурные параметры первого рода, в следующем виде

$$\min_{u^k,\alpha_{jk}} \sum_{k=1}^{N} F^k\left(x^k, u^k, y^k\right), \tag{5 24}$$

$$M = \sum_{k=1}^{N} m_k \tag{5.25}$$

$$\sum_{j=1}^{N} \alpha_{jk} = 1, \tag{5 26}$$

$$y^k = \varphi^k\left(x^k, u^k\right), \tag{5 27}$$

$$h^k\left(x^k, u^k\right) \le 0, \tag{5 28}$$

$$0 \le \alpha_{jk} \le 1, \quad j = \overline{1,N}, \quad k = \overline{1,N} \tag{5 29}$$

Здесь уравнения (5 25), (5 26) являются, соответственно, уравнениями материального баланса смесителя и делителя потоков, условия (5 28) – проектные ограничения

Поисковыми переменными являются структурные параметры $\alpha_{jk}, j = \overline{1,N}, \ k = \overline{1,N}$ и управляющие переменные u^k Их число равно $N^2 + R, \ R = \sum_{k=1}^{N} r^k$ При этом подходе переменные $x^k, y^i, k = \overline{1,N}, \ j = \overline{1,N}$ являются зависимыми переменными Они определяются решением систе-

мы нелинейных уравнений (5 25)–(5 27) при фиксированных значениях поисковых переменных u^k, α_{jk} Формально этот подход сводит комбинаторную задачу синтеза ХТС к задаче нелинейного программирования Однако имеется ряд трудностей, с которыми приходится сталкиваться при использовании этого подхода

1 В ряде случаев некоторые структурные параметры α_{jk} становятся двоичными переменными Так, структурный параметр α_{jk} становится двоичной переменной, если относительно потока, связывающего k-й и j-й блок, необходимо решить вопрос – должен или не должен он присутствовать в схеме В этом случае задача синтеза сводится к нелинейной дискретно-непрерывной задаче оптимизации Однако в случае большого количества таких параметров предложенная процедура может привести к большим вычислительным затратам

2 Рассматриваемый подход не предусматривает исключение поисковых переменных α_{jk} $\left(j=\overline{1,N}\right)$ в случае, когда характерный размер k-го блока $u^k=0$

3. При использовании структурных параметров первого рода трудно включить в задачу эвристические правила, формализованные в виде логических условий

4. В ряде случаев полученная задача нелинейного программирования является многоэкстремальной Использование универсальных методов глобальной оптимизации мало перспективно в связи с большой размерностью задачи и вероятностью большого числа локальных минимумов Более перспективен поиск причин многоэкстремальности и построение методов на основе знания этих причин *Одной из причин* многоэкстремальности является наличие билинейных членов в формулировке задачи (см (5 25)) *Второй источник* возможной многоэкстремальности – это вид критерия (5 24) Как правило, когда этот критерий представляет собой приведенные затраты и $F^k=G^k+H^k$ – часть критерия, относящаяся к k-му блоку, G^k, H^k – капитальные и технологические затраты k-го блока соответственно, часть G^k имеет вид

$$G^k=c\left(u_l^k\right)^b,\ b\le 1, \qquad (5\ 30)$$

где u_j^k – характерный размер k-го блока, b - показатель степени

Вообще говоря, параметры c, b и индекс l должны зависеть от блока, однако ради простоты обозначений мы опускаем зависимости этих параметров от индекса k Когда $b < 1$ - это вогнутая функция, и критерий (5 24) включает многоэкстремальность. *Третий источник* – бесконечное значение производной функции капитальных затрат в начальной точке

Докажем существование *многоэкстремальности* задачи синтеза

Пусть имеется задача.

$$\min_{x_1,x_2,\ldots,x_n} f(x_1,\ldots,x_n),$$
$$\phi(x_1,\ldots,x_n) \le 0, \qquad (5\ 31)$$
$$x_1 \ge 0,$$

где f – гладкая функция

При $x_1 = 0$ и любых значениях переменных $x_2,\ldots,x_n$ имеет место неравенство

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x_1}\right|_{x_1=0} \ge 0 \qquad (5\ 32)$$

Рассмотрим задачу

$$\min_{x_2,x_3,\ldots,x_n} f(0,x_2,\ldots,x_n),$$
$$\phi(0,x_2,\ldots,x_n) \le 0 \qquad (5\ 33)$$

Предположим, что задача (5.33) имеет решение и точка $\bar{x}^*\left(0,x_2^*,\ldots,x_n^*\right)$ является точкой минимума Покажем, что она является точкой минимума задачи (5 31)

Известно, что необходимым условием того, что некоторая точках x^0 есть локальный минимум задачи (5 31), является условие

$$\left.\frac{\partial f}{\partial l}\right|_{x=x^0} \ge 0,\ \forall l \in L\left(x^0\right), \qquad (5\ 34)$$

где l - единичный вектор. $L(x^0)$ – множество допустимых векторов в точке x^0

Если точка x^0 лежит на поверхностях $\phi_i(x_1,\ldots,x_n)=0,\ i=i_1,\ldots,i_p$, то $L(x^0)$ имеет вид

$$L\left(x^0\right)=\left\{l\cdot(l,\operatorname{grad}\phi_i)\le 0,\ \phi_i(x_1,\ldots,x_n)=0,\ i=i_1,\ldots,i_p\right. \qquad (5\ 35)$$

Если x^0 - внутренняя точка допустимой области (5 31), то $L(x^0)$ представляет собой множество всех единичных векторов с началом в точке x^0

Поскольку точка $\bar{x}^*$ является точкой минимума в задаче (5 33), то имеет место соотношение

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{l}} \ge 0,\quad \bar{l} \in \bar{L}\left(x^*\right),$$

где $\bar{l}=l\left(0,l_2,\ldots,l_n\right)$ – единичный вектор в подпространстве $x_2,\ldots,x_n$, а $l_i=(l.e_i)$ – проекция вектора $\bar{l}$ на i-ю ось координат (e_i - единичный вектор вдоль i-й оси)

Запишем выражение для производной по направлению в пространстве

$x_1, x_2, \ldots, x_n$ в точке $\left(0, x_2^*, \ldots, x_n^*\right)$. $\dfrac{\partial f}{\partial l} = l_1 \dfrac{\partial f}{\partial x_1} + \sum\limits_{i=2}^{n} l_i \dfrac{\partial f}{\partial x_i}$

Ясно, что $\sum\limits_{i=2}^{n} l_i \dfrac{\partial f}{\partial x_i} = \dfrac{\partial f}{\partial \bar{l}}$

Отсюда, принимая во внимание (5 34), получим

$$\sum_{i=2}^{n} l_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \geq 0 \qquad (5\ 36)$$

Поскольку должно выполняться условие $x_1 \geq 0$, то в соответствии с (5 35) получим

$$l_1 = (l, e_1) \geq 0 \qquad (5\ 37)$$

Учитывая (5 32), (5.36), (5 37), получим, что в точке $\left(0, x_2^*, \ldots, x_n^*\right)$ выполняется условие (5 34) и, следовательно, она является точкой минимума задачи (5 31)

Рассмотрим теперь задачу (5 24)–(5 29) Исключим из этой задачи ограничения равенства (5 26), выразив с помощью каждого из них одни из структурных параметров через остальные. Тогда задача (5 24)–(5 29) сводится к задаче типа (5 31), в которой в качестве переменных выступают переменные $\alpha_{jk}, u^k, j = \overline{1, N}, \ k = \overline{1, N}$ кроме тех структурных параметров, которые были исключены с помощью соотношений (5 26) Из (5 30) при $b<1$ имеем $\left.\dfrac{\partial G^k}{\partial u_l^k}\right|_{u_l^k = 0} = cb\left(u_l^k\right)^{b-1}\Big|_{u_l^k = 0} = \infty$ при любых значениях остальных переменных Подставим $u_l^k = 0$ в задачу (5 24)–(5 29) Пусть полученная задача имеет решение, а (α^*, u^*) есть точка минимума этой задачи (вектор u^* содержит все компоненты векторов u^p, $\left(p = \overline{1, N}\right)$ за исключением компоненты u_l^k) Тогда, в соответствии с вышеприведенным утверждением, точка ($\alpha^*, u_l^k = 0$, u^*) есть точка локального минимума этой задачи Поскольку u_l^k является характерным размером k-го блока, то этот локальный минимум соответствует схеме, в которой отсутствует k-й блок Аналогично, можно показать, что если задача (5 24)–(5 29) имеет решение при

$$u_l^k = 0, \ k = k_1, \ldots, k_p, \qquad (5\ 38)$$

где $k_1, \ldots k_p$ - номера некоторых блоков

то будет существовать локальный минимум, для которого будут выполняться условия (5 38) Этому локальному минимуму соответствует схема, в которой отсутствуют блоки с номерами k_1, ,k_p

Таким образом, при $b<1$ комбинаторная задача определения оптимальной структуры сводится к комбинаторной задаче поиска глобального минимума среди некоторого множества локальных минимумов, каждому из которых соответствует некоторая схема

Синтез с использованием структурных параметров второго рода

Рассмотрим теперь подход к синтезу ХТС, использующий структурные параметры второго рода. Обозначим через y_j^k, часть i-й компоненты расхода выходного потока k-го блока, подаваемую на j-й блок Ясно, что выполняется соотношение $y_{ji}^k = \alpha_{jk} y_i^k$,

где y_j^k – количество i-й компоненты в выходном потоке k-го блока

В качестве поисковых переменных в данном случае берутся переменные y_j^k, x_i^k (количество i-й компоненты во входном потоке k-го блока), структурные параметры δ_k и управляющие переменные u^k Задача синтеза ХТС сводится к следующей нелинейной дискретно-непрерывной задаче оптимизации

$$\min_{\delta_k, u^k, y_j^k, x_i^k} \sum_{k=1}^{N} F^k\left(x^k, u^k, y^k\right), \tag{5 39}$$

$$x_i^k = \sum_{l=1}^{N} y_{ki}^l, \tag{5 40}$$

$$y_i^k = \sum_{l=1}^{N} y_{ki}^l, \tag{5 41}$$

$$\left(y_{j1}^k + \ldots + y_{jn}^k\right) y_i^k = \left(y_1^k + \ldots + y_n^k\right) y_{ji}^k, \tag{5 42}$$

$$y^k = \varphi^k\left(x^k, u^k\right), \; h^k\left(x^k, u^k\right) \le 0, \tag{5 43}$$

$$u^k \le \delta_k \bar{u}^k, \; x_i^k \le \delta_k \bar{x}_i^k, \tag{5 44}$$

$$\delta_k = 0 \text{ или } 1, \; k = \overline{1, N}, \; j = \overline{1, N}, \; i = \overline{1, N} \tag{5 45}$$

Здесь уравнения (5-40), (5-41) представляют собой уравнения материального баланса смесителя и делителя потока k-го блока Уравнения (5-42) отражают тот факт, что соотношения для компонента потока до делителя

должны равняться соотношениям для компонента в любом из N потоков, получаемых после делителя Уравнения (5 44) искусственно введены в задачу Они обеспечивают выполнение условий u^k=0, x^k=0 при δ_k=0 (отсутствие k-го блока в схеме) В этом случае y^k=0, и вклад k-го блока F^k(0,0,0) также станет равным нулю. Величины $\bar{x}_i^k, \bar{u}^k$ – известные верхние границы переменных x_i^k, u^k

Для того, чтобы избавиться от одного из источников многоэкстремальности – вогнутости функции G^k, используется следующая аппроксимация этой функции

$$\overline{\mathrm{G}}^k = \gamma^k \delta^k + \beta^k u_l^k,$$

$$u_l^k \le \bar{u}_l^k \delta_k,\ l = \overline{1, r_k},$$

где параметры γ^k, β^k подбираются из условия наилучшего приближения функции G^k к $\overline{G}^k$

Использование структурных параметров δ_k позволяет, в отличие от первого подхода, просто учитывать различные логические условия

Так, в задачах синтеза часто требуется выбрать только один блок из нескольких возможных (например, необходимо выбрать одно аппаратурное оформление процесса из нескольких возможных). Пусть номера этих блоков – $j_1, j_2, \ldots, j_k$, тогда это условие может быть записано в виде

$$\delta_{j_1} + \delta_{j_2} + \ldots + \delta_{j_k} = 1$$

И задача синтеза (5.39)–(5 45) должна быть дополнена этим соотношением

Рассмотрим другой пример Пусть мы хотим использовать при синтезе правило если используется аэротенк (номер его равен s), то выбрать вторичный отстойник (номер q) Это правило может быть смоделировано неравенством $\delta_s - \delta_q \le 0$, которое должно быть включено в формулировку задачи

Остановимся теперь на числе поисковых переменных Ранее указывалось, что число структурных параметров δ_k равно N Отсюда число дискретных переменных в данном случае равно N Подсчитаем число непрерывных переменных Рассмотрим k-й блок Потоку, подаваемому с k-го блока на j-й, соответствует n переменных y_{ji}^k Всего таких потоков N Кроме того, имеется n переменных x_i^k, связанных с входным потоком Отсюда одному блоку соответствует $(N+1)n+r_k$ переменных, а N блокам – $(N+1)Nn+R$ переменных Итак, в задаче имеется N дискретных и

$(N+1)Nn+R$ непрерывных переменных Как видно, число непрерывных переменных в данном случае существенно возросло *Другим недостатком* является существенное увеличение числа нелинейных ограничений типа равенств, поскольку уравнения моделей (см (5 43)) становятся ограничениями типа равенств В то же время известно, что предпочтительнее переносить нелинейности в критерий, а не в ограничения

Рассмотренные подходы позволяют сделать предположение о перспективности использования обоих типов структурных параметров

Модифицированный метод структурных параметров

Н Зиятдинов предложил использовать оба типа структурных параметров Прежде всего, вносится одно изменение в способ построения глобальной схемы В данном случае между выходом k-го блока и его делителем устанавливается дополнительный делитель (рис 5 19), который часть потока δ_k подает в первый делитель, а часть $(1-\delta_k)$ выводит из схемы

Задача синтеза ХТС в данном случае формулируется следующим образом

$$I_0^0 = \min_{u^k,\alpha_{kj},\delta_k} \sum_{k=1}^{N} \delta_k I^k\left(x^k, u^k, y^k\right), \tag{5 46}$$

$$x^k = \sum_{j=1}^{N} \alpha_{kj}\delta_k y^j, \tag{5 47}$$

$$\sum_{j=1}^{N} \delta_k \alpha_{jk} = \delta_k, \tag{5 48}$$

$$y^k = \varphi^k\left(x^k, u^k\right), \tag{5 49}$$

$$h^k\left(x^k, u^k\right) \le 0, \tag{5 50}$$

$$0 \le \alpha_{jk} \le 1, \tag{5 51}$$

$$\delta_k = 0 \text{ или } 1, \quad k = \overline{1,N} \tag{5 52}$$

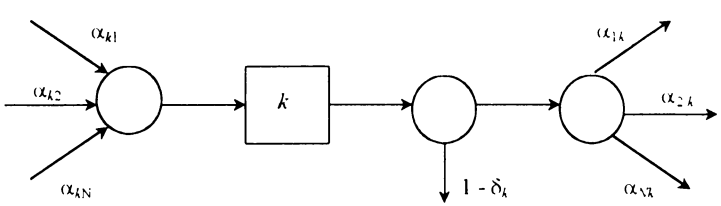


Рис 5 19 Использование структурных параметров первого и второго рода

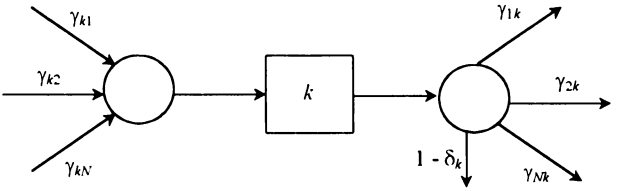


Рис 5 20 Объединение делителей потоков при одновременном использовании структурных параметров первого и второго рода

Здесь уравнение (5.47) является уравнением материального баланса смесителя k-го блока, а (5-48) – уравнением материального баланса двух последовательных делителей k-го блока Разделив на δ_k обе части уравнения (5 48), мы получим (5 26) Однако делить на δ_k нельзя, поскольку δ_k может обращаться в ноль Сделаем замену переменных $\gamma_{kj} = \alpha_{kj}\delta_k$ и объединим два последовательных делителя потоков в один (рис 5 20)

Тогда задача запишется в виде

$$F_0^0 = \min_{u^k, \gamma_{kj}, \delta_k} \sum_{k=1}^{N} \delta_k F^k\left(x^k, u^k, y^k\right), \tag{5 53}$$

$$x^k = \sum_{j=1}^{N} \gamma_{kj} y^j, \tag{5 54}$$

$$\sum_{j=1}^{N} \gamma_{jk} = \delta_k, \tag{5 55}$$

$$y^k = \varphi^k\left(x^k, u^k\right), \tag{5 56}$$

$$h^k\left(x^k, u^k\right) \le 0, \tag{5 57}$$

$$0 \le \gamma_{jk} \le 1, \tag{5 58}$$

$$\delta_k = 0 \text{ или } 1, \quad k = \overline{1, N}. \tag{5 59}$$

Структурные параметры γ_{jk} отличаются от структурных параметров α_{ik} тем, что в соответствии с (5 55) имеют место соотношения $\gamma_{jk} = 0, \quad j = \overline{1, N}$, если $\delta_k = 0$ Отсюда, если $\delta_k = 0$, то все выходные потоки k-го блока равны нулю, а вклад его в критерий также равен нулю Следует отметить, что, по-видимому, имеет смысл добавить следующее ограничение

$$\sum_{j=1}^{N} \gamma_{kj} \le N\delta_k$$

В этом случае, если $\delta_k = 0$, то $\gamma_{jk} = 0, j = \overline{1, N}$, и все входные потоки в k-й блок будут равны нулю

В данном случае поисковыми переменными являются непрерывные переменные u^k, γ_{jk}, $\left(k = \overline{1, N},\ j = \overline{1, N}\right)$, и дискретные переменные δ_k, $\left(k = \overline{1, N}\right)$

Этот подход имеет свои преимущества и недостатки. По сравнению со вторым подходом число непрерывных переменных существенно меньше – (N^2+R) вместо $(N+1)Nn+R$ Простота учета логических условий с помощью структурных параметров δ_k дает преимущество этому подходу по сравнению с первым подходом Кроме того, вопрос о вхождении k-го блока в схему решается на основе того, какое (0 или 1) значение принимает переменная δ_k В то же время при первом подходе, для того, чтобы показать, что k-й блок не входит в схему, необходимо доказать, что N переменных $\alpha_{jk} = 0,\ j = \overline{1, N}$

Недостатки этого подхода аналогичны недостаткам первого и второго подхода Здесь возможно появление многоэкстремальности при $h<1$, как в первом подходе, и из-за наличия билинейных членов (см 5 54), как во втором подходе

Для решения задачи (5 53)–(5 59) воспользуемся методом ветвей и границ

Алгоритм ветвления метода ветвей и границ

Опишем кратко процедуру метода ветвей и границ применительно к нашей задаче Это многошаговая процедура Каждому шагу этой процедуры соответствует свой граф Граф, соответствующий k-му шагу, будем для простоты изложения называть k-графом Правила получения $(k+1)$-го графа из k-графа следующие

Среди всех висячих вершин k-графа по некоторому правилу (об этом будет сказано ниже) выбирается одна вершина, для которой строится $(N-k)$ потомков Тогда $(k+1)$-граф будет состоять из вершин k-графа и построенных $(N-k)$ потомков Вершины графа будем обозначать через A_i^j, где верхний индекс есть номер шага, а нижний – номер висячей вершины, полученной на $(j-1)$-м шаге На рис 5 21 представлен 4-граф (N=4),

Здесь 1-граф состоит из одной вершины A_1^1, 2-граф состоит из вершины A_1^1 и ее потомков $A_1^2, A_2^2, A_3^2, A_4^2$, 3-граф состоит из вершин $A_1^2, A_2^2, A_3^2, A_4^2$ и потомков вершины A_2^2, построенных на втором шаге (вершин A_1^3, A_2^3, A_3^3) и т д

При этом вершине A_1^1 соответствует глобальная схема, каждой вершине $A_i^2, \left(i = \overline{1,4}\right)$ соответствует схема, полученная из глобальной удалением одного из блоков, каждой вершине $A_i^l, \left(i = \overline{1,k_l}\right)$ соответствует схема, полученная из глобальной удалением каких-либо (l-1) блоков Поскольку отсутствие k-го блока в схеме соответствует тому, что соответствующий структурный параметр $\delta_k = 0$, то каждой вершине A_i^J соответствует свой набор $S_i^J = \left\{q_1^J, \ldots, q_i^J\right.$ равных нулю структурных параметров $\delta_k = 0,\ k = q_1^J, \ldots, q_i^J$

Обозначим через K_i^J множество номеров структурных параметров, отличных от нуля в вершине A_i^j

$$K_i^J = \left\{k \quad k \in K, k \notin S_i^J \right. \text{, где } K = (1, N)$$

Часть глобальной схемы, соответствующую вершине A_i^J, будем называть ij-глобальной схемой Задача оптимизации ij-глобальной схемы запишется в виде

$$F_i^j = \min_{u^k, \gamma_{kj}, \delta_k} \sum_{k \in K_i^J} \delta_k F^k\left(x^k, u^k, y^k\right), \tag{5.60}$$

$$x^k = \sum_{s \in K_i^J} \gamma_{ks} y^s, \tag{5 61}$$

$$\sum_{s \in K_i^J} \gamma_{sk} = \delta_k, \tag{5 62}$$

$$y^k = \varphi^k\left(x^k, u^k\right), \tag{5 63}$$

$$h^k\left(x^k, u^k\right) \le 0, \tag{5.64}$$

$$0 \le \gamma_{jk} \le 1, \tag{5 65}$$

$$\delta_k = 0 \text{ или } 1, \quad k \in K_i^J \tag{5 66}$$

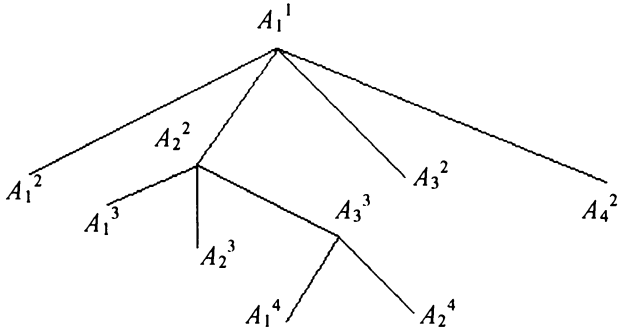


Рис 5 21 Граф, соответствующий третьему шагу (4-граф)

Наряду с задачей (5 60)-(5 66) будем рассматривать задачу, в которой ограничение (5 66) заменено на ограничение $0 \le \delta_k \le 1, \ k \in K_i^j$

Оптимальное значение критерия в задаче (5 60)-(5 65), (5 67) обозначим через $\overline{\overline{F}}_i^j$ Ясно, что существует соотношение $\overline{F}_i^j = F_i^j$

В дальнейшем любую величину, меньшую чем A_i^j, будем называть нижней оценкой вершины A_i^j и обозначать через $\underline{A}_i^j$ В соответствии с (5 68), в качестве ρ_i^j может быть взята величина $\underline{A}_i^j$ Обозначим через R^j множество висячих вершин на j-м шаге (j-графе) На графе, изображенном на рис 5 21 в множество висячих вершин R^4 входят вершины $A_1^2, A_3^2, A_4^2, A_1^3, A_2^3, A_1^4, A_2^4$

Пусть известны нижние оценки всех висячих вершин множества R^j Тогда на j-м шаге процедуры метода ветвей и границ выполняются следующие операции

1 Среди множества вершин, полученных на j-м шаге, находится висячая вершина, имеющая самую малую нижнюю оценку Будем называть эту вершину квазиоптимальной

2 В квазиоптимальной вершине строим (N-j) потомков Эта операция называется операцией ветвления

3 Определяется нижняя граница для всех потомков квазиоптимальной вершины

Поскольку существует соотношение (5 68), то в качестве нижней оценки вершины A_i^j может быть взята величина $\overline{F}_i^j$, полученная решением задачи (5 60)-(5 65), (5 67)

4 Для всех потомков определяется верхняя граница Она может быть оп-

ределена следующим образом Пусть в вершине A_i^j величины $u^{k*}, \alpha_{kj}^*, \delta_k^*$ являются решением задачи (5 60)-(5 65), (5 67) Образуем новые значения переменных следующим образом

$$r^j = \min_{A_i^l \in T^j} \overline{\overline{F}}_i^l$$

Подставляя величины $\bar{\delta}_k$ в задачу (5 60)-(5 65) получим обычную задачу нелинейного программирования

Обозначим через $\overline{\overline{F}}_i^j$ оптимальное значение критерия в этой задаче Поскольку существует соотношение $\overline{\overline{F}}_i^j \geq F_i^j$, то в качестве верхней оценки вершины A_i^j может быть взята величина $\overline{\overline{F}}_i^j$ Обозначим через T^j множество всех квазиоптимальных вершин, полученных на j-м и всех предшествующих шагах На графе рис 5 22 это множество состоит из вершин A_1^1, A_2^2, A_3^3 Тогда верхнюю оценку r^j на j-м шаге будем определять следующим образом

$$r^j = \min_{A_i^l \in T^j} \overline{\overline{F}}_i^l$$

5 Определение неперспективных вершин Предположим, что существует неравенство $\rho_i^j > r^j$ Тогда легко видеть, что ij-глобальная схема не будет содержать оптимальной схемы Следовательно, эта вершина является неперспективной, и она должна быть исключена из дальнейшего решения

Возможна некоторая модификация предложенной процедуры синтеза, при которой в квазиоптимальной вершине A_i^j строится только два потомка При этом одному потомку соответствует ij-глобальная схема, в которой k-го блока нет В первом потомке δ_k=1, а во втором δ_k=0 В данном случае k-й блок называется блоком ветвления в вершине A_i^j В остальном описанная выше процедура синтеза остается без изменения, необходимо только добавить правило выбора блока ветвления в квазиоптимальной вершине Возможны различные правила такого выбора Например, в качестве блоков ветвления для потомков квазиоптимальной вершины A_i^j можно задавать поочередно блоки ij-глобальной схемы Возможны и другие способы выбора блоков ветвления

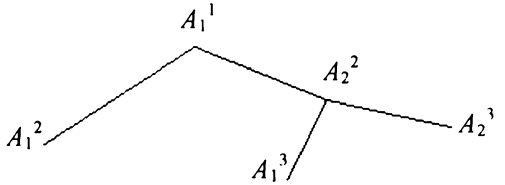


Рис 5 22 Двоичный граф

Следует отметить, что возможно и комбинированное использование описанных способов ветвления – некоторые квазиоптимальные вершины A_i^j могут иметь два потомка, некоторые – (N-j) потомков

5.6.5 Разработка подходов, методов оптимизации и расчета биотехнологических систем

Важным вопросом оптимизации технологических схем является выбор пространства переменных, в котором ведется поиск оптимального режима Обычно в качестве поисковых переменных принимаются управляющие переменные в аппаратах и входные переменные схемы Однако в ряде случаев оказывается целесообразным использовать в качестве поисковых переменных некоторые промежуточные переменные схемы, либо комбинацию управляющих и промежуточных переменных Показано, что такой выбор приводит к расчетной схеме, содержащей меньше обратных связей Выбор в качестве поисковых переменных наряду с управляющими, некоторых промежуточных потоков, приводящих схему к разомкнутому виду, показывает, что расчет критерия оптимизации становится простым и сводится к однократному расчету разомкнутой схемы Однако уравнения связи по разрываемым потокам выносят в виде ограничений-равенств в задачу оптимизации, чем усложняют поиск оптимума

В работе Н Зиятдинова рассматривается влияние выбора пространства независимых переменных на задачу оптимизации технологической схемы, содержащей тепловые рециркуляционные потоки В результате предлагается вариант, позволяющий вычислять критерий оптимизации и ограничения без использования итерационных процедур

Задача оптимизации технологических схем содержит три типа переменных – входные, выходные и управляющие переменные аппаратов схемы x, y, u

При постановке любой задачи оптимизации часть переменных принимается в качестве независимых (поисковых) Поисковыми или независимыми называются переменные, в пространстве которых ведется поиск минимального значения критерия (5 14) Зависимыми переменными явля-

ются те из переменных x, y, u, которые на каждом шаге процедуры оптимизации (при каждом вычислении критерия (5 14) определяются с помощью системы (5 9)-(5 11) или ее части для заданных значений независимых переменных При этом та часть системы, которая используется для определения зависимых переменных, будет удовлетворяться на каждом шаге оптимизации, уравнения оставшейся части системы считаются ограничениями типа равенств и учитываются с помощью методов условной минимизации Переходя от системы (5 9)-(5 11) к (5 17), переменные y можно исключить из рассмотрения и определять их после нахождения переменных x Метод решения задачи оптимизации схемы существенно зависит от того, какие из переменных будут взяты в качестве поисковых, какие из уравнений (5 13), (5 17) будут удовлетворяться на каждом шаге оптимизации и какие необходимо будет считать ограничениями типа равенств в соответствующей задаче на условный экстремум Рассмотрим некоторые типичные подходы к выбору поисковых переменных

Для простоты предположим, что в задаче оптимизации имеются только ограничения-равенства (5 13) и позиционные ограничения на управляющие переменные, которые запишем в следующем виде

$$u \in D_1,\ D_1 = \{u \ \ c \le u \le b\}, \tag{5 69}$$

где c, b - некоторые заданные векторы размерности r.

Выбор поисковых переменных

1. Поиск в пространстве управляющих переменных

В качестве поисковых выбираются переменные u, а переменные x считаются зависимыми Учет (5 13) может быть произведен двумя способами

В первом случае соотношения (5 13) считаются ограничениями типа равенств, налагаемыми на u, и учитываются с помощью методов условной минимизации Оптимизации может быть представлена в форме **задачи 1**

$$\min_{u} F(x,u) \tag{5 70}$$
$$f(x,u) = 0$$

$$u \in D_2 \tag{5 71}$$
$$D_2 = \{u \ \ u \in D_1, \psi(x,u) = 0\}$$

Поиск ведется в пространстве переменных u при каждом фиксированном значении u переменные x находятся из системы уравнений (5 70) На каждом шаге оптимизационной процедуры удовлетворяются уравнения (5.70), а с помощью методов условной минимизации необходимо учитывать ограничения (5 71)

При втором способе учета ограничения (5 13) включаются в число

уравнений, которые выполняются на каждом шаге оптимизационной процедуры Число уравнений, которым удовлетворяют переменные u, x, возрастает на величину m_1 по сравнению с предыдущим случаем На такую же величину должно возрасти число зависимых переменных, определяемых из системы уравнений (5.13), (5.17). Число управляющих переменных перейдет в число зависимых переменных. Обозначим вектор этих переменных через $\overline{\overline{u}}$. Оставшаяся часть управляющих переменных составит вектор независимых переменных $\overline{u}$. Оптимизация может быть представлена в форме **задачи 2**:

$$\min_{u} F\left(x, \overline{u}, \overline{\overline{u}}\right)$$

$$\overline{f}\left(x, \overline{u}, \overline{\overline{u}}\right) = 0 \qquad (5\ 72)$$

$$\overline{\psi}\left(x, \overline{u}, \overline{\overline{u}}\right) = 0 \qquad (5\ 73)$$

$$u \in D_1 \qquad (5\ 74)$$

Запись вектор-функций $\overline{f}, \overline{\psi}$ отличается от записи (5 9), (5 13) тем, что вектор u разбит на два вектора $\overline{u}, \overline{\overline{u}}$ Поиск ведется в пространстве переменных $\overline{u}$ При каждом фиксированном значении $\overline{u}$ зависимые переменные x, $\overline{\overline{u}}$ находятся из системы уравнений (5.72), (5 73). Таким образом, они удовлетворяются на каждом шаге оптимизационной процедуры, а с помощью методов условной минимизации учитываются только ограничения (5.74).

Иногда решение системы (5.70) называют моделирующим расчетом схемы, а решение (5.72), (5 73) – проектным расчетом схемы

2. Поиск в пространстве управляющих переменных и части переменных состояния

Поисковыми переменными принимаются управляющие переменные u, а также часть переменных состояния x Оставшаяся часть переменных x будет зависимой Обозначим через $\overline{x}$ вектор, компонентами которого являются зависимые переменные состояния, а через $\overline{\overline{x}}$ – вектор, компонентами которого являются независимые переменные состояния Перепишем систему (5 17) в виде

$$\overline{x} - \overline{\varphi}\left(\overline{x}, \overline{\overline{x}}, u\right) = 0, \qquad (5\ 75)$$

$$\overline{\overline{x}} - \overline{\overline{\varphi}}\left(\overline{x}, \overline{\overline{x}}, u\right) = 0, \qquad (5\ 76)$$

где $\overline{\varphi}$ – часть вектор-функции φ, соответствующая переменным $\overline{x}$, $\overline{\overline{\varphi}}$ – часть φ, соответствующая переменным $\overline{\overline{x}}$

Система уравнений (5 75) будет удовлетворяться на каждом шаге оптимизационной процедуры, а уравнения системы (5.76) считаются ограничениями типа равенств и учитываются с помощью методов условной минимизации Оптимизация может быть представлена в форме **задачи 3**

$$\min_{u,\bar{x}} F\left(\bar{\bar{x}}, \bar{x}, u\right) \qquad (5\ 77)$$

$$\bar{x} - \bar{\varphi}\left(\bar{\bar{x}}, \bar{x}, u\right) = 0$$

$$u, \bar{x} \in D_3 \qquad (5\ 78)$$

$$D_3 = \left\{u, \bar{x} \,.\, u \in D_1, \bar{\psi}\left(\bar{\bar{x}}, \bar{x}, u\right) = 0, \bar{x} - \bar{\varphi}\left(\bar{\bar{x}}, \bar{x}, u\right) = 0\right.$$

Запись вектор-функции $\bar{\psi}$ отражает разбиение вектора x на две части

Поиск ведется в пространстве переменных u, $\bar{x}$ при каждых фиксированных значениях u, $\bar{x}$ переменные $\bar{\bar{x}}$ находятся из системы уравнений (5.77), а ограничения (5 78) удовлетворяются с помощью методов условной минимизации

3. Поиск в подпространствах управляющих переменных и переменных состояния

Поисковыми являются части управляющих переменных и переменных состояния Зависимыми переменными будут оставшиеся части управляющих переменных и переменных состояния Задача выбора независимых переменных может быть сведена к задаче замены управляющих переменных и переменных состояния Так, в качестве независимой переменной k-го аппарата может быть принята выходная переменная этого аппарата, а переменная управления отнесена к числу зависимых переменных Поясним на примере Предположим, что в оптимизируемую схему входит теплообменник-холодильник Управляющей переменной в нем является расход хладагента, а температура на выходе является переменной состояния В описанном подходе предлагается в качестве поисковой (независимой) переменной принять выходную температуру, а расход хладагента рассматривать как зависимую переменную Причем по модели теплообменника всегда можно рассчитать расход хладагента, обеспечивающий заданную температуру

В данном подходе формулировка задачи оптимизации сводится к одной из трех вышеизложенных задач

Рекомендации по выбору поисковых переменных

Выбор поисковых переменных в каждом из рассмотренных подходов имеет свои преимущества и недостатки.

При первом подходе для расчета критерия требуется решение системы нелинейных уравнений, что для замкнутых схем является достаточно трудоемкой процедурой Чаще всего необходим этап структурного анализа для повышения эффективности этой процедуры

В задаче 1 число поисковых переменных равно размерности вектора управляющих переменных Соотношения (5 13) учитываются методами условной минимизации, и процедура оптимизации является трехуровневой (см рис 5 23) первый уровень соответствует решению системы материального и теплового баланса схемы при фиксированных значениях поисковых переменных *u*, на втором уровне переменные *u* изменяются в соответствии с каким-либо методом безусловной минимизации, третий уровень соответствует изменению параметров модифицированного критерия в методе условной минимизации, который используется для выполнения ограничений (5 13)

При отсутствии ограничений (5 13) могут быть использованы методы безусловной минимизации, модифицированные для учета простейших ограничений (5 69) Оптимизационная процедура в этом случае будет состоять только из двух уровней – 1-го и 2-го

В задаче 2 число поисковых переменных несколько уменьшается по сравнению с предыдущим случаем Поскольку соотношения (5 13) выполняются на каждом шаге, то могут использоваться методы безусловной минимизации, модифицированные для учета простейших ограничений (5 69) Оптимизационная процедура в данном случае двухуровневая (рис 5 24) Расчет критерия более трудоемок, чем в задаче 1, поскольку требует решения системы уравнений материального и теплового баланса совместно с уравнениями ограничений-равенств Однако, если добавление системы (5 13) к (5 17) ненамного ухудшает скорость сходимости числовой процедуры на первом уровне, то задача 2 может оказаться более эффективной

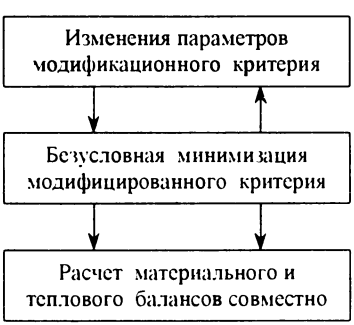


Рис 5 23 Трехуровневая процедура оптимизации
Рис 5 24 Двухуровневая процедура оптимизации

Второй подход в основном применяют для того, чтобы добиться безитерационного расчета критерия, выбирая в качестве независимых переменных $\overset{=k}{x}$, $k = (p_1, \ldots, p_q)$, результирующая схема должна быть разомкнутой, т е чтобы система уравнений (5 77) допускала безитерационный расчет Число поисковых переменных увеличивается по сравнению с задачей 1 Учет ограничений (5 13) проводится методами условной минимизации Если суммарная размерность векторов u, $\overset{=}{x}$ мала по сравнению с $\bar{x}$, то **задача 3** может оказаться предпочтительнее **задачи 1**, поскольку незначительное увеличение размерности задачи может быть скомпенсировано безитерационным расчетом критерия (в предположении, что добавление новых штрафных членов модифицированного критерия ненамного ухудшает скорость сходимости метода)

Выбор независимых переменных в третьем подходе обеспечивает ряд преимуществ Выбрав итерируемыми переменными потоки при расчете материального и теплового балансов, можно добиться понижения размерности системы решаемых нелинейных уравнений, а также некоторого увеличения устойчивости итерационного процесса расчета схемы При решении задачи оптимизации в постановке 1, 2 возможен случай, когда на некотором итерационном шаге расчета схемы отсутствует решение для отдельного аппарата Подобного затруднения можно избежать, если в качестве поисковых переменных принять некоторые переменные состояния с двухсторонними ограничениями, обеспечивающими условия физической реализуемости процесса Появляется возможность расчета на одном итерационном уровне выходных и промежуточных потоков, удовлетворяющих регламентным границам Часть управляющих переменных, ставших зависимыми и входящих в критерий оптимизации, может быть рассчитана после полного сведения материального и теплового балансов, что значительно сокращает время расчета критерия

Возникает вопрос, в каких случаях целесообразно применять тот или иной подход Накопленный практический опыт позволяет дать рекомендации для отдельных случаев

1 Если схема разомкнута и отсутствуют ограничения (5 13), целесообразно применять первый подход (постановка задачи 1)

2 Если схема разомкнута и имеются ограничения (5 13), целесообразно применять первый подход

3 Если схема замкнута, большинство аппаратов охвачено обратными связями, целесообразно отдать предпочтение второму подходу

4 Во всех случаях целесообразно рассмотреть возможность замены переменных

Поскольку использование того или иного подхода связано с выбором поисковых переменных, то возникает задача выбора наилучшей совокуп-

Рис 5 23 Простая последовательность аппаратов

ности поисковых переменных Эта задача чрезвычайно сложна, что связано с трудоемкостью формулирования критерия, который позволял бы оценивать тот или иной набор поисковых переменных до решения задачи оптимизации Наилучшим критерием, с точки зрения практики, является время решения задачи оптимизации Поэтому необходимы косвенные оценки, эвристические правила, экспериментальные факты В качестве примера рассмотрим оптимизацию последовательности аппаратов (рис 5 23)

Пусть в данном случае $n_k = l_k = n,\ r_k = r,\ \left(k = \overline{1,N}\right)$ Соотношения связи (5 10) имеют простой вид

$$x_i^k - y_i^{k-1} = 0,\ i = \overline{1,n},\ k = \overline{2,N}$$

Ограничения-равенства наложены на выходные переменные N-го аппарата

$$y_j^N - a_j^N = 0,\ j = \overline{1,n}$$

Ограничения неравенства отсутствуют

В случае сведения оптимизации к задаче 1, когда поисковыми являются управляющие переменные всех аппаратов схемы, на втором уровне при использовании метода штрафов будет решаться следующая задача

$$\min_{u^k}\left(F + \sum_{j=1}^{n}\gamma_j\left(y_j^N - a_j^N\right)^2\right),\ k = \overline{1,N},$$

где y_j^N определяются последовательным расчетом всех аппаратов при заданных значениях $u^k, \left(k = \overline{1,N}\right)$

Рассмотрим **задачу 3** В качестве поисковых переменных наряду с управляющими $u^k, \left(k = \overline{1,N}\right)$ берутся переменные

$$x_i^k\ \ i = \overline{1,n},\ k = \left(p_1,\ldots,p_q\right) \qquad (5\ 79)$$

На втором уровне решается задача

$$\min_{u^k\ x^s}\left(F + \sum_{j=1}^{n}\gamma_j\left(y_j^N - a_j^N\right)^2 + \sum_{k=p_1}^{p_q}\sum_{i=1}^{n}\beta_i^k\left(x_i^k - y_i^{k-1}\right)\right), s = p_1,\ldots,p_q, k = \overline{1,N} \quad (5\ 80)$$

Число поисковых переменных равно $m=rN+nq$ Предположим, что ча-

стные производные вычисляются с помощью разностного метода Поставим задачу определения «наилучшей» совокупности переменных (5 79) Обозначим через τ, T_1, T_2, соответственно, времена расчета k-го аппарата, схемы и градиента критерия, тогда $T_1=N\tau$ Сделаем три допущения

1 Предположим, что число поисковых направлений пропорционально размерности задачи, т е равно γm, где γ - коэффициент пропорциональности

2 Число вычислений критерия δ на каждом поисковом направлении постоянно

3 Выполняется свойство штрафных функций – добавление новых штрафных членов целевой функции, незначительно ухудшает скорость сходимости метода

4 Используя первые два допущения, получим оценку времени T решения задачи оптимизации

$$T = \delta\gamma m T_1 + \gamma m T_2 = \gamma m\left(\delta T_1 + T_2\right)$$

Величина T используется в качестве критерия выбора переменных (5 79) Для вычисления частных производных используем «зоны влияния», применение которых позволяет существенно сократить количество вычислений Совокупность аппаратов с номерами от p_k до p_{k+1}-1, будем называть k-м участком Рассмотрим частный случай, когда последовательность аппаратов (рис 5 26) разбивается на участки с равным количеством аппаратов, т е. $p_{k+1} - p_k = \dfrac{N}{(q+1)}$ Новыми выходными переменными схемы будут $y', \left(i = \mathrm{p}_1 - 1, \ldots, \mathrm{p}_\mathrm{q}, \mathrm{N}\right)$

Время вычисления частных производных критерия по управляющим переменным и входным переменным x^{p_k} (k+1)-го участка равно

$$\tau\left(\frac{nN}{q+1} + \frac{1}{2}\frac{rn}{q+1}\left(\frac{N}{q+1}+1\right)\right)$$

Отсюда общее время

$$T = \tau\gamma\left(rN + nq\right)\left(\delta N + nN + 0.5rn\left(\frac{N}{q+1}+1\right)\right). \qquad (5\ 81)$$

Итак, задача выбора оптимальной совокупности дополнительных переменных (5 79) свелась к минимизации функции T по целочисленной переменной q Анализ (5 81) показывает эффект введения новых независимых переменных Действительно, если $rN>>nq$, то с увеличением q первая скобка увеличивается незначительно, а во второй скобке третье слагаемое уменьшается примерно пропорционально q Отсюда, при достаточно больших N, увеличение q может уменьшить общую величину T

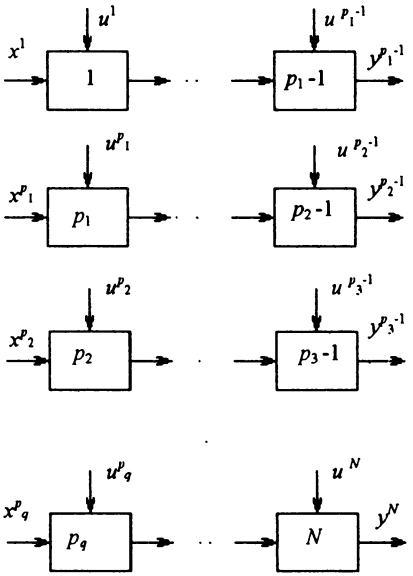


Рис 5.26. Последовательность с равным количеством аппаратов

В качестве примера рассмотрим задачу оптимизации последовательности реакторов идеального смешения, в которых проводится реакция A→B→C Максимизируется выход целевого продукта B при заданной степени превращения вещества A и заданной суммы времен контакта реакторов. В качестве управляющих переменных для каждого аппарата использовались время контакта и температура В данном случае n=2, кроме того, было принято N=16, δ=4. Из формулы (5 81) следует, что наименьшее значение T получается при q=5, при этом время решения уменьшается в 1,8 раза Проведенный численный эксперимент оптимизации схемы с различным числом разрывов показал, что введение уже одного разрыва уменьшает время решения в 1,8 раза, в дальнейшем увеличение числа разрывов увеличивало время решения. По-видимому, при q>1 не выполнялось третье допущение, с учетом которого была выведена формула (5 81) Таким образом, при разностном вычислении производных может оказаться целесообразным вводить дополнительные разрывы потоков даже в разомкнутых схемах

«Полуаналитический» метод расчета градиента критерия по поисковым переменным.

Методы переменной метрики требуют знания первых производных критерия на каждом направлении поиска. Наиболее эффективным спосо-

бом их вычисления является метод «сопряженного» процесса Однако вывод и программирование уравнений сопряженного процесса приводят к трудоемкой процедуре, что является причиной широкого использования разностного метода вычисления производных. В этом случае производные функции F вычисляются с помощью формулы:

$$g_j \equiv \frac{\partial F}{\partial u_j} = \frac{F\left(u_1,\ldots,u_j+\Delta u_j,\ldots,u_r\right)-F\left(u_1,\ldots,u_j,\ldots,u_r\right)}{\Delta u_j},$$

где Δu_j – специально подобранная малая величина.

Выбор больших значений Δu_j приводит к грубой оценке производных из-за погрешности метода конечных разностей При малых Δu_j могут искажаться значения производных (вплоть до знака) в связи с тем, что расчет схемы осуществляется с некоторой погрешностью Для замкнутых схем разностный расчет производных критерия является трудоемкой итерационной процедурой, т.к. для каждого приращения поисковой переменной требуется полный расчет стационарного режима схемы.

В случае разомкнутых схем трудоемкость разностного вычисления производных можно несколько облегчить, если использовать «зоны влияния». Напомним, что i-й блок включается в «зону влияния» k-го блока в том и только в том случае, если существует путь, связывающий k-й и i-й блоки. Так, k-й блок простой последовательности блоков (без рецикла) имеет «зону влияния», состоящую из блоков $k,(k+1),..,N$. Рассмотрим k-й блок Будем предполагать, что в номинальном режиме известны значения всех входных промежуточных переменных схемы. Тогда при вычислении частных производных критерия по переменной $u_j^k\left(j=1,\ldots,r_k\right)$ придется рассчитывать не всю схему, а только блоки, входящие в его «зону влияния»

Ниже предложен алгоритм «полуаналитического» расчета градиента критерия для замкнутых схем, в котором разностным способом вычисляются производные критерия для разомкнутой схемы, а производные для замкнутой схемы определяются с помощью точных формул, связывающих их для замкнутой и разомкнутой схем. Это позволяет избегать трудоемких итерационных процедур при вычислении производных.

Пусть необходимо минимизировать критерий (5 14) при ограничениях, определяемых уравнениями стационарного режима (5.17) Будем предполагать, что в качестве поисковых выбраны переменные u, а переменные x считаются зависимыми.

Соотношения (5.17) определяют переменные x как неявные функции переменных u Учитывая это, представим критерий оптимизации в виде функции переменных u

$$F^* = F(x(u), u)$$

Требуется найти

$$g_J = \frac{\partial F^*}{\partial u_J}, \; J = \overline{1,r} \tag{5 81}$$

Продифференцируем функцию F как сложную функцию переменных u_j

$$\frac{\partial F^*}{\partial u_J} = \sum_{i=1}^{m} \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial u_J} + \frac{\partial F}{\partial u_J}, \; J = \overline{1,r} \tag{5 82}$$

Введем матрицы

$$\frac{\partial F}{\partial u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial u_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial u_r} \end{pmatrix}, \frac{\partial F}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial x_m} \end{pmatrix}, \frac{\partial x}{\partial u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial x_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial x_m}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial x_m}{\partial u_r} \end{pmatrix}$$

соответственно размерности $r\times1$, $m\times1$, $m\times r$

Тогда соотношения (5 82) могут быть переписаны в матричном виде

$$\frac{\partial F^*}{\partial u} = \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right)^T \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial u} \tag{5 83}$$

Для определения матрицы $\frac{\partial x}{\partial u}$ продифференцируем i-е уравнение системы (5 17) по переменным u_j

$$\frac{\partial x_i}{\partial u_J} - \sum \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k} \frac{\partial x_k}{\partial u_J} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial u_J} = 0, \; i = \overline{1,m} \tag{5 84}$$

Соотношения (5 84) представляют собой систему m линейных уравнений с m неизвестными $\frac{\partial x_k}{\partial u_j}\left(k = \overline{1,m}\right)$, перепишем их в матричном виде

$$\left(1 - \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) \frac{\partial x}{\partial u_j} = \frac{\partial \varphi}{\partial u_j}, \tag{5 85}$$

где $\frac{\partial x}{\partial u_J}$ является J-м столбцом матрицы $\frac{\partial x}{\partial u}$.

а матрицы $\frac{\partial \varphi}{\partial u_J}$ размерности $m\times1$ и $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ размерности $m\times m$ имеют вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial u_j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial u_j} \\ \vdots \\ \frac{\partial \varphi_m}{\partial u_j} \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \varphi_m}{\partial x_m} \end{pmatrix}$$

Для определения матрицы $\frac{\partial x}{\partial u}$ необходимо решить r систем линейных уравнений (5 85) для $j = \overline{1,r}$ Матрица коэффициентов y них будет одна и та же, а отличаться они будут только правыми частями Все r систем линейных уравнений (5.85) могут быть записаны с помощью следующего матричного уравнения.

$$\left(1 - \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)\frac{\partial x}{\partial u} = \frac{\partial \varphi}{\partial u}, \tag{5 86}$$

откуда

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \left(1 - \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^{-1}\frac{\partial \varphi}{\partial u} \tag{5 87}$$

где матрица $\frac{\partial \varphi}{\partial u}$ размерности m×r имеет своими столбцами матрицы $\frac{\partial \varphi}{\partial u_j}\left(j = \overline{1,r}\right)$

Остановимся на схемной интерпретации матриц $\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial u}, \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ Матрицы $\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial F}{\partial x}$ представляют собой совокупности производных критерия по поисковым и входным переменным соответствующей разомкнутой схемы, а $\frac{\partial \varphi}{\partial u}, \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ – совокупности производных выходных переменных соответствующей разомкнутой схемы по поисковым и входным переменным этой схемы

Итак, для определения производных (5 81) необходимо рассчитать ряд частных производных разомкнутой схемы и найти матрицу, обратную к матрице $\left(1 - \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)$ Выполнение этих операций не требует проведения итерационных процедур на уровне расчета схемы, поэтому предложенный подход может оказаться более эффективным по сравнению с разностным вычислением производных.

Поскольку вычисление производных замкнутой схемы мы заменили вычислением производных для разомкнутой схемы, то становится воз-

можным использование «зон влияния» для вычисления последних Это может существенно сократить количество вычислений

Здесь возникает новая задача структурного анализа – выбор оптимального разрывающего множества (ОРМ), которому соответствует наименьшее время расчета матриц

$$\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial \varphi}{\partial u}, \qquad (5\ 88) \qquad \frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad (5\ 89)$$

Предположим, что вся схема состоит из одного комплекса Обозначим через $M(k)$ множество номеров блоков, входящих в «зону влияния» k-го блока для вычисления столбцов матриц (5 88) Пусть τ_j – среднее время расчета j-го блока Обозначим через T_k время расчета блоков, входящих в «зону влияния» k-го блока, тогда

$$T_k = \sum_{j \in M(k)} \tau_j$$

Обозначим через $T'(Q)$ время расчета матриц (5 88) для заданного разрывающего множества Q Оно равно

$$T'(Q) = \sum_{k=1}^{N} r_k T_k$$

Обозначим через $\overline{M}(i)$, $(i \in Q)$ множество номеров блоков, входящих в «зону влияния» i-го потока для вычисления матриц (5 89), а через $\overline{T}_i$, – время их расчета Пусть I_k – множество номеров входных потоков k-го блока Очевидно, что если $i \in I_k$, то существуют соотношения

$$\overline{M}(i) \equiv M(k),\ \overline{T}_i \equiv T_k$$

Пусть $T''(Q)$ – время расчета матриц (5 89) для заданного множества Q, тогда

$$T''(Q) = \sum_{i \in Q} n_i \overline{T}_i,$$

где n_i – размерность i-го потока

Общее время расчета матриц (5 88), (5 89) будет равно

$$T(Q) = T'(Q) + T''(Q) = \sum_{k=1}^{N} r_k T_k + \sum_{i \in Q} n_i \overline{T}_i \qquad (5\ 90)$$

Таким образом, задача структурного анализа формулируется следующим образом необходимо найти такое множество, чтобы величина $T(Q)$ принимала минимальное значение

При определении ОРМ для расчета схем обычно в качестве критерия оптимизации используется величина

$$I = \sum_{i \in Q} n_i, \qquad (5\ 91)$$

которую необходимо минимизировать

Поскольку для определения ОРМ надо учитывать как расчет схемы, так и расчет матриц (5.88), (5.89) для вычисления градиента, то задача выбора ОРМ является двухкритериальной комбинаторной задачей с критериями (5 90), (5 91)

Квазиоптимальное решение поставленной задачи структурного анализа может быть получено следующим образом В начале решается задача определения ОРМ применительно к задаче расчета схемы, т е для критерия (5 91) Затем среди этих множеств путем перебора выбирается то, для которого критерий (5 90) принимает минимальное значение

Сделаем оценку эффективности использования «полуаналитического» метода расчета производных по сравнению с разностным методом Предположим, что система уравнений (5 17) линейна, и для ее решения квазиньютоновским методом требуется $R=m+1$ расчетов разомкнутой схемы, где m – размерность системы (5 17) Обозначим через r – размерность поисковой задачи (вектора u) и через k – число направлений поиска ($k=r+1$ – в квадратичном случае) Для расчета производных $\frac{\partial F^*}{\partial u}$ разностным способом на одном направлении потребуется $(r+1)(m+1)$ – расчетов разомкнутой схемы, и общее число расчетов разомкнутой схемы будет равно

$$k(r+1)(m+1) = (r+1)(r+1)(m+1)$$

При «полуаналитическом» методе расчета имеем kr - число расчетов разомкнутой схемы для определения частных производных $\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial \varphi}{\partial u}$, $(m+1)$ – число расчетов разомкнутой схемы для определения $\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial x}$ при первом расчете стационарного режима Общее число расчетов разомкнутой схемы при «полуаналитическом» расчете производных будет равно

$$kr + (m+1) = (r+1)r + (m+1)$$

Обозначим через I отношение $\frac{(r+1)(r+1)(m+1)}{(r+1)r + (m+1)}$, характеризующее эффективность «полуаналитического» метода Например, при $r=5$, $m=11$

$$I = \frac{6 \cdot 6 \cdot 12}{6 \cdot 5 + 12} = 8\ 3$$

Выигрыш в числе вычислений разомкнутой схемы при расчете производных «полуаналитическим» методом по сравнению с разностным мето-

дом составляет 8,3 раза Для нелинейной системы эффективность «полуаналитического» метода также возрастает, т к $R> m+1$ и $k> r+1$ При оценке эффективности мы считали, что затраты времени на решение матричных уравнений (5 83), (5 85), (5 86), (5 87) несравненно меньше затрат, необходимых для расчета разомкнутой схемы Приведенная оценка не учитывает «зон влияния», которые дадут дополнительный выигрыш

Ниже приводится алгоритм на основе квазиньютоновских методов, в котором улучшается сходимость процедуры расчета схем

Квазиньютоновский метод расчета материальных и тепловых балансов с блочной аппроксимацией

Для расчета материальных и тепловых балансов химико-технологических систем в настоящее получили широкое распространение квазиньютоновские методы Как и любые методы, они имеют свои преимущества и недостатки

Опыт показывает, что число итераций квазиньютоновских методов растет пропорционально размерности решаемых систем нелинейных уравнений Поэтому расчет технологических систем с множеством материальных и тепловых рециклов может стать довольно трудоемкой задачей Можно предложить одновременный (параллельный) способ решения системы (5 9)–(5 11), при котором в качестве итерируемых принимаются все переменные $x^k, k = \overline{1,N}$ В этом случае расчет сводится к решению N уравнений с N неизвестными Покажем эффективность предлагаемого подхода В отличие от метода Бройдена будем аппроксимировать саму матрицу Якоби, а не обратную ей Причем будем аппроксимировать матрицу Якоби не сразу для всей системы уравнений, а только матрицы Якоби правых частей системы уравнений отдельных блоков (5 9) Обозначим через x^{ki}, y^{ki} значения векторов x^k, y^k на i-й итерации, $s^{ki}=x^{ki+1}-x^{ki}$, $z^{ki}=\varphi^{ki+1}-\varphi^{ki}$ Введем матрицы $Z^{ki}=\left(z^{k0},\ldots,z^{ki-1}\right)$, $S^{ki}=\left(s^{k0},\ldots,s^{ki-1}\right)$ Обозначим через B^{ki} аппроксимацию матрицы Якоби $J^{ki}=\left(\frac{\partial\varphi^k}{\partial x}\right)$ на i-й итерации Доказано, что матричное соотношение

$$Z^{ki}=J^{ki}S^{ki} \qquad (5\,92)$$

для линейных систем выполняется точно, а для нелинейных – с точностью до бесконечно малых первого порядка Найдем матрицу B^{ki} из уравнения

$$Z^{ki}=B^{ki}S^{ki}$$

Для определения B^{ki} можно воспользоваться двумя способами При первом способе B^{ki} находится только после n_k итераций, при этом

$$B^{ki}=Z^{ki}\left(S^{ki}\right)^{-1}$$

На l-й итерации ($l \geq n_k+1$) один из столбцов матриц Z^{kl}, S^{kl} заменяется новыми векторами z^{kl}, s^{kl}, полученными на этой итерации При втором способе для определения B^{kl} используется одна из формул семейства

$$B^{ki+1} = B^{kl} + \frac{\left(z^{ki} - B^{kl} s^{kl}\right) c^{kl\,T} E^{kl}}{c^{kl\,T} E^{ki} z^{ki}},$$

$$E^{ki+1} = E^{ki} + \frac{E^{ki} z^{ki} c^{ki\,T} E^{kl}}{c^{ki\,T} E^{ki} z^{ki}},$$

$$B^{k0} = E^{k0} = I_{n_k},$$

где c^{kl} - вектор произвольных постоянных размерности n_k

После определения всех B^{kl}, k= 1,2,. ,N становится известной матрица Якоби всей системы (5 9)-(5 11) Однако, для определения приращения итерируемых векторов Δx^{kl}, не обязательно находить общий вид матрицы Якоби, т к зная B^{kl} и вид системы (5 9)-(5 11) можно сразу написать систему уравнений для определения Δx^{kl} Действительно, с точностью до бесконечно малых первого порядка имеем

$$y^{ki} + \Delta y^{ki} = \varphi^k\left(x^{ki}\right) + J^{kl} \Delta x^{ki} \qquad (5\ 93)$$

Кроме того,

$$\Delta x^{ki} = \sum_{j=1}^{N} \Delta y^{ji} \alpha_{kj} \qquad (5\ 94)$$

Заменим в (5.93) J^{kl} ее аппроксимацией B^{kl} и запишем в виде

$$\Delta y^{ki} = B^{ki} \Delta x^{ki} + \varphi^k\left(x^{ki}\right) - y^{ki} \qquad (5\ 95)$$

Уравнения (5 94), (5 95) можно интерпретировать как математическую модель схемы, структура которой совпадает со структурой исходной технологической схемы, а модели блоков линейны Поэтому для их решения могут быть использованы последовательные способы расчета

Сравним последовательный и параллельный подходы для гипотетического случая Пусть все модели (5 9) линейны, вид их неизвестен, но по заданным x^k можно рассчитать y^k Последовательный метод расчета требует (m+1) шаг для решения системы (5 9)–(5 11) При параллельном методе для построения полной матрицы Якоби потребуется $\bar{n} = \max\{n_k\}$ шагов, и решение будет получено на (n+1)-м шаге Если m>n, то выгоднее применение параллельного способа Отметим интересное свойство – количество итераций при решении системы не зависит от ее размерности Количество итераций будет определяться только размерностью отдельных блоков Бо-

лее того, усложнение структуры (увеличение количества обратных связей в схеме) так же не будет увеличивать количество итераций В то же время при последовательном методе расчета увеличение количества обратных связей в схеме может увеличить значение m и существенно повысить количество итераций Приведенные соображения верны для линейных систем, однако, подобное поведение можно ожидать и при решении нелинейных систем, близких к линейным

5.6.6. Разработка многоуровневого метода анализа, оптимизации, синтеза биотехнологических систем

Как было показано в разделе 5 6 3 методы оптимального синтеза, основанные на интегрально-гипотетическом подходе, представляют собой многоуровневую процедуру Для построения многоуровневого метода синтеза необходимо выбрать критерий эффективности метода и разработать принципы сопряжения алгоритмов разных уровней

Выбор критерия эффективности многоуровневого метода

При разработке многоуровневого метода и оценке его эффективности, как и при разработке любых методов минимизации, необходимо учитывать ряд важных факторов универсальность, надежность и точность, чувствительность к параметрам и исходным данным, затраты на предварительную обработку и вычисления, сходимость Отсюда следует, что эффективность многоуровневого метода является многокритериальным показателем, главными критериями при этом являются глобальная и локальная сходимость и быстродействие В свою очередь, быстродействие метода синтеза характеризуется такими показателями, как число ветвлений на гиперструктуре и число расчетов разомкнутой схемы при решении задачи расчета и оптимизации, полученной на данном шаге синтеза Очевидно, что быстродействие, как критерий эффективности многоуровневого алгоритма синтеза, должно характеризоваться общим числом расчетов разомкнутой схемы при решении задачи синтеза, равным произведению числа ветвлений на число расчетов разомкнутой схемы

$$K_c = \sum_{j=1}^{k_v} \sum_{i=1}^{k_{lj}} l_{ij} \qquad (5\ 96)$$

где l_{ij} – число расчетов разомкнутой схемы при выполнении i-й оптимизационной процедуры j-го шага синтеза, k_v – число шагов синтеза (ветвлений), k_{lj} – число обращений к оптимизационной процедуре на j-м шаге синтеза

Принципы сопряжения многоуровневых методов

При построении эффективного многоуровневого метода, необходимо учитывать следующие правила

Правило 1. Алгоритмы каждого уровня должны рассматриваться как взаимосвязанные части единого алгоритма синтеза, согласованные друг с другом

Несколько усложнив работу алгоритмов одного уровня, можно существенно улучшить работу алгоритмов других уровней, что в целом приведет к более эффективной работе всей процедуры и, наоборот, улучшив работу алгоритмов только одного уровня, можно усложнить работу алгоритмов других уровней, что приведет к менее эффективной работе всего метода

Рассмотрим два примера

Выбором поисковых переменных (см раздел 5 6 5) можно упростить расчет схемы (первый уровень), сделав его безитерационным, но существенно усложнить второй и третий уровень (возрастает число штрафных членов) И наоборот, усложнив алгоритм первого уровня учетом ограничений-равенств, можно существенно упростить вычисления на 2-м и 3-м уровнях (3-й уровень может отсутствовать)

Другой пример – выбор шага в формуле линейного поиска метода безусловной минимизации (2-й уровень) При применении методов безусловной минимизации существует правило чем больше шаг вдоль направления поиска, тем лучше В том случае, когда первый уровень является безитерационным, правило остается верным и для многоуровневых процедур В случае, когда первый уровень требует итераций, правило, вообще говоря, неверно Действительно, при увеличении шага вдоль поискового направления, с одной стороны, уменьшается количество итераций на втором уровне С другой стороны, ухудшаются начальные приближения при решении системы первого уровня, что может привести к увеличению количества итераций или потере сходимости Существует компромисс, при котором шаг вдоль направления должен быть наилучшим с точки зрения общего количества итераций первого и второго уровней Это подтверждает целесообразность выбора в качестве критерия оценки эффективности многоуровневой процедуры синтеза общего числа однократных расчетов соответствующей разомкнутой схемы

Правило 2 Максимальное использование информации, полученной на предыдущей процедуре

В многоуровневой процедуре j-му шагу k-го уровня соответствует некоторая итерационная процедура (k-1)-го уровня Так, j-му шагу 2-го уровня соответствует итерационная процедура решения системы нелинейных уравнений Итерационному шагу 3-го уровня соответствует итерационная процедура безусловной минимизации 2-го уровня Для просто-

ты дальнейшего изложения итерационную процедуру (k-1)-го уровня, соответствующую j-му шагу k-го уровня, будем называть j-й итерационной процедурой k-го уровня

Сформулируем рассматриваемое правило следующим образом при построении начального приближения j-й итерационной процедуры k-го уровня необходимо использовать информацию, полученную при проведении (j-1)-й итерационной процедуры k-го уровня

Рассмотрим **1-й уровень** блок-схемы на рис 5 16 Пусть требуется решать систему (5 17) для последовательности векторов u^j (j=1,2, ,) Предположим, что векторы u^j изменяются незначительно, и имеет место соотношение

$$\left\| u^{j+1} - u^j \right\| \le \varepsilon, \quad j = 1,2,\ldots, \tag{5 97}$$

где ε – малая величина

Будем считать, что система (5 17) определяет переменные x как неявные непрерывные функции переменных u

$$x^* = x^*(u), \; f\left(x^*(u), u\right) = 0$$

Введем обозначения

$$x^{*j} = x^*\left(u^j\right), \; J^{*j} = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x = x^{*j},\, u = u^j},$$

т е x^{*j} есть решение системы (5 17) при u=u^j

Пусть с помощью одного из квазиньютоновских методов найдено решение системы (5 17) при u=u^j, причем аппроксимировалась сама матрица Якоби Обозначим через B^{*j} предельное значение матрицы, аппроксимирующей матрицу Якоби Предположим, что B^{*j} достаточно близка к матрице J^{*j} Пусть теперь требуется найти решение системы (5 17) при u=u^{j+1}

$$f\left(x, u^{j+1}\right) = 0, \tag{5 98}$$

где u^{j+1} удовлетворяет (5 97)

Из соотношения (5 97) и непрерывности функций $x^*(u)$ вытекает, что x^{*j+1} будет достаточно близка к x^{*j}, т е

$$\left\| x^{*j+1} - x^{*j} \right\| < \delta, \tag{5 99}$$

где δ – малая величина

Отсюда, при решении системы (5 98) в качестве начальных значений для переменных x целесообразно применять значение x^{*j}, полученное на предыдущей итерации $x^{0j+1} = x^{*j}$,

что обеспечит хорошее начальное приближение для x и быструю сходимость квазиньютоновского метода Рассмотрим выбор начального приближения матрицы B^{0j+1} при решении системы (5 98) При выполнении условий (5 97), (5 99) и допущении, что кривизна функции F невелика (критерий – пологая функция независимых переменных), можно предположить, что матрица B^{*j}, полученная на предыдущем шаге, будет хорошим приближением J^{*j+1} Поэтому в качестве начального приближения матрицы B^{0j+1} при решении системы (5.98) целесообразно взять матрицу B^{*j} По сравнению с разностной аппроксимацией матрицы Якоби этот прием избавляет от дополнительных расчетов левых частей системы (5 98) в начальной точке Хорошее начальное приближение позволяет отказаться от требования уменьшения норм левых частей системы (5 98) на каждом направлении i, т е отказаться от выбора t^{i} в (5 19) из условия минимизации или уменьшения функции на каждом шаге, что было вызвано желанием обеспечить устойчивость поиска даже при плохом начальном приближении В данном случае t^{i} полагается равным единице, как и в ньютоновском методе.

Рассмотрим **второй уровень** соответствующий безусловной минимизации целевой функции на примере метода штрафов, где минимизируется

$$\Phi^{j} = F + \gamma^{j}\psi^{2}$$

при фиксированном значении коэффициента γ^{j} (для простоты предположим, что имеется только одно ограничение типа равенства). Величина коэффициента γ^{j} назначается на 3-м уровне Обозначим через G^{*j} предельное значение матрицы, аппроксимирующей обратную матрицу Гессе, полученное при минимизации Φ^{j} каким-либо квазиньютоновским методом Поскольку значение G^{*j} будет близко к значению обратной матрице Гессе функции Φ^{j}, выберем его в качестве начального приближения G^{0j} при минимизации функции Φ^{j+1} с $\frac{\partial x_k}{\partial u_j}$ ($k = \overline{1, m}$)

Аналогично предлагается поступать при использовании метода модифицированных функций Лагранжа Однако следует иметь в виду, что значительное увеличение штрафного коэффициента может привести к большой погрешности

Рассмотрим выбор шага (коэффициента α^{i}) в линейном поиске метода безусловной минимизации в случае задачи 3 (см раздел 5 6 5) Поскольку на 1-м уровне процедура безитерационная, то на величину α^{i} не накладывается никаких ограничений со стороны 1-го уровня, и она выбирается из условия минимизации числа вычислений целевой функции На каждом направлении происходит линейный поиск точки, удовлетворяющей условиям уменьшения или минимизации функции на каждом шаге Поиск

начинается с начального шага, значение которого существенно влияет на число шагов в выбранном направлении, а, следовательно, и на общее количество шагов Предположим, что на двух соседних направлениях (i-м и (i-1)-м) нормы $\left\|u^{i+1}-u^{i}\right\|$ и $\left\|u^{i}-u^{i+1}\right\|$ близки, поэтому начальный шаг на (i+1)-м направлении выбирается из условия $\alpha^{0i+1}=\gamma\alpha^{*i}$ Множитель γ, близкий к единице, выбирается опытным путем, α^{*_i} является оптимальным значением шага в i-м направлении

На основании описанных правил предложен принцип сопряжения уровня дискретной оптимизации глобальной схемы с нижестоящими уровнями параметрической оптимизации и расчета Результатом очередного шага дискретной оптимизации гиперструктуры является технологическая схема, которая в общем случае может включать рецикловые потоки, то есть быть замкнутой Принципом сопряжения уровня синтеза с нижестоящими уровнями расчета и оптимизации является проведение структурного анализа технологической схемы, полученной на очередном шаге дискретной оптимизации глобальной схемы, по критерию минимальной параметричности потоков, поскольку доказано, что в этих случаях число итераций пропорционально размерности решаемой задачи (в частности, при использовании метода Вольфа или квазиньютоновских методов) Поскольку результатом структурного анализа является совокупность множества разрываемых потоков, то далее необходим выбор среди них единственного, желательно совпадающего с множеством разрываемых потоков, использованным на предыдущей процедуре синтеза Это позволит использовать в качестве начальных приближений для итерируемых и поисковых переменных решения, полученные на предшествующих процедурах оптимизации и расчета. Если такое множество отсутствует, то при выборе единственного разрывающего множества предлагается использовать критерий (5 90), соответствующий минимальному времени расчета матриц частных производных разомкнутой схемы с учетом «зон влияния»

Построение многоуровневого метода

Разработанный в соответствии с изложенными принципами метод сводит задачу синтеза к последовательности задач безусловной минимизации и представляет многоуровневую процедуру (см рис 5 27), где уровни

0-й – расчет отдельного аппарата,

1-й – алгоритм расчета стационарного режима технологической схемы,

2-й – алгоритм безусловной минимизации модифицированного критерия,

3-й – алгоритм изменения параметров модифицированного критерия,

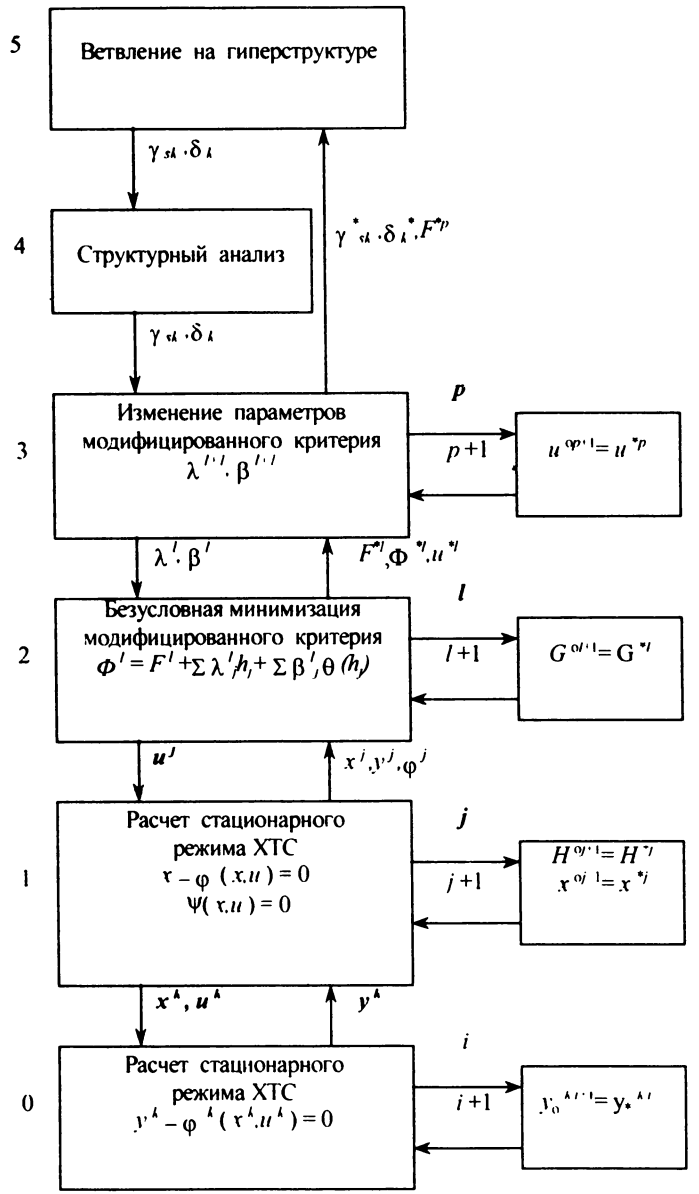


Рис. 5.27 Многоуровневый метод синтеза

4-й – алгоритм структурного анализа,

5-й – алгоритм ветвления на гиперструктуре

Рассмотрим подробнее каждый уровень процедуры

На нулевом уровне на (i+1)-й итерации расчета схемы для некоторых выходных параметров k-го блока y^k, рассчитываемых итерационно, в качестве начальных приближений принимают решения, полученные на i-й итерации $\left(y_0^{k,i+1} = y_*^{k,i}\right)$

На первом уровне используется последовательный модульный подход к расчету стационарного режима Метод расчета выбирается из квазиньютоновских и позволяет учитывать ограничения-равенства, накладываемые на выходные и промежуточные переменные схемы Учет ограничений-равенств на уровне расчета схемы упрощает свойства сконструированного модифицированного критерия Решаемая система нелинейных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} f_i\left(x_i, \bar{x}_j, u\right) &= x_i - \varphi_i\left(x_i, \bar{x}_j, u\right) = 0, \\ f_{m+j}\left(x_i, \bar{x}_j, u\right) &= \psi_j\left(x_i, \bar{x}_j, u\right) = 0, \end{aligned} \qquad (5\ 100)$$

где $x_i, i = \overline{1, m}$ – вектор итерируемых переменных, полученный в результате структурного анализа схемы, $x_j, j = \overline{1, m_1}$ – вектор дополнительных итерируемых переменных, обеспечивающих выполнение ограничений равенств (5 100), $m_3 = m + m_1$ – суммарная размерность решаемой системы.

Последовательные приближения x^l определяются по формулам (5 19), (5 20) Уточнение обратной матрицы Якоби H^l проводится по рекуррентным соотношениям (5 21)-(5 23). В качестве начальных оценок обратной матрицы Якоби и решения на (j+1)-й итерационной процедуре принимаются оценка обратной матрицы Якоби и решение, полученные в предшествующем расчете стационарного режима

$$H^{0j+1} = H^{*j}, \; x^{0j+1} = x^{*j} \qquad (5\ 101)$$

Если в предшествующем расчете оказывается, что число расчетов разомкнутой схемы

$$i > m_3 + 1, \qquad (5\ 102)$$

то в качестве оценки H^{0j+1} принимается обратная матрица разностной аппроксимации матрицы Якоби

$$H^{0j+1} = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^{-1}\Bigg|_{x = x^{*j}},$$

что обеспечивает более надежную сходимость метода

Оценка (5 101) избавляет от необходимости разностного вычисления матрицы Якоби и ее обращения для всех значений поисковых переменных u, за исключением исходной точки процедуры и при выполнения условия (5 102) Блок-схема алгоритма первого уровня представлена на рис 5 28

Второй уровень предназначен для безусловной минимизации модифицированного критерия Функция включает только ограничения-неравенства и имеет вид

$$\Phi^l(u,\lambda,\beta) = F(u) + \sum_{j=1}^{m_2}\lambda_j h_j(u) + \sum_{j=1}^{m_2}\beta_j\theta_j\left(h_j(u)\right), \qquad (5\ 103)$$

где λ_j – множители Лагранжа, β_j – штрафные коэффициенты, $\theta_j=0$, если $h_j(u)\le 0$ и $\theta_j = h_j^2$, если $h_j(u) > 0$, $j = \overline{1,m_2}$

Для минимизации функции (5 103) используются квазиньютоновский метод сопряженных относительно матрицы Гессе направлений и алгоритм одномерного спуска вдоль выбранного направления Для уточнения матрицы G^l (обратной к матрице Гессе) используется формула Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шенно В качестве начального приближения обратной матрицы Гессе на (l+1)-й итерационной процедуре принимается матрица, полученная в результате предшествующего этапа минимизации

$$G^{0l+1} = G^{*l}$$

Для расчета первых производных критерия используется «полуаналитический» метод Значение начального шага на (i+1)-м направлении в алгоритме одномерного спуска выбирается из условия

$$\alpha^{0i+1} = \gamma\alpha^{*i},$$

где α^{*i} – оптимальное значение шага в i-м направлении, γ – опытный множитель, близкий к единице

Блок-схема алгоритма второго уровня представлена на рис 5 29

Третий уровень реализует метод модифицированных функций Лагранжа Генерируется последовательность множителей Лагранжа и штрафных коэффициентов по алгоритму

$$\lambda^{l+1} = \lambda^l + 2\cdot\lambda^l h(u),$$
$$\beta^{l+1} = 10\cdot\beta^l$$

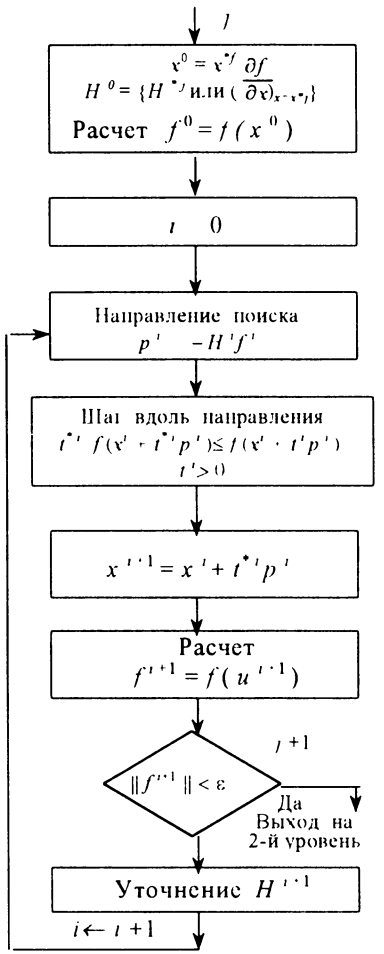


Рис 5 28 Блок-схема первого уровня

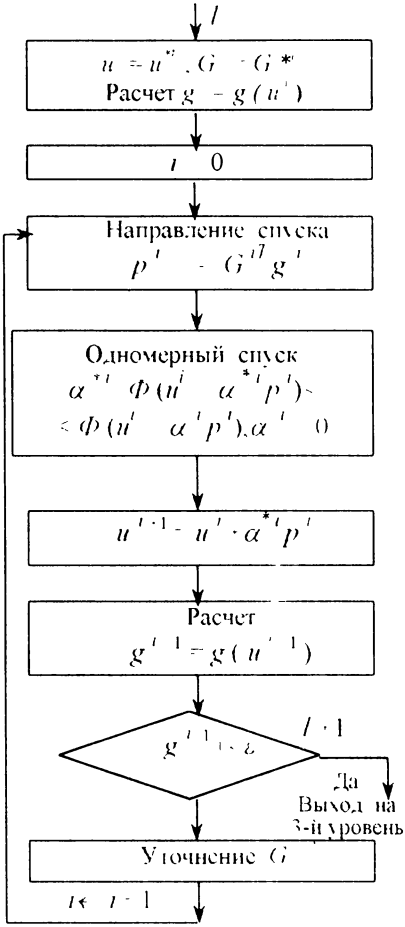


Рис 5 29 Блок-схема второго уровня

Четвертый уровень проводит структурный анализ технологической схемы, полученной на очередном шаге ветвления Задача структурного анализа решается в двухкритериальной постановке, предложенной выше с применением алгоритма определения всех оптимально-разрывающих множеств В результате структурного анализа определяются условно-разрываемые потоки и последовательность расчета аппаратов технологической схемы

Пятый уровень включает алгоритм ветвления на гиперструктуре в случае, если некоторые структурные параметры являются целочисленными

Для этого используется алгоритм метода ветвей и границ, предложенный выше

5.6.7. Задача структурно-параметрической оптимизации технологической схемы БОСВ

Описание критерия, поисковых переменных и ограничений

В качестве гиперструктуры для решения задачи выбора одного из основных блоков схемы, распределения нагрузок между аэротенками в этих блоках, выбора способа утилизации активного ила и определения режима работы полученной схемы БОСВ, при минимуме эксплуатационных затрат, была принята информационная блок-схема, представленная на рис 5 30

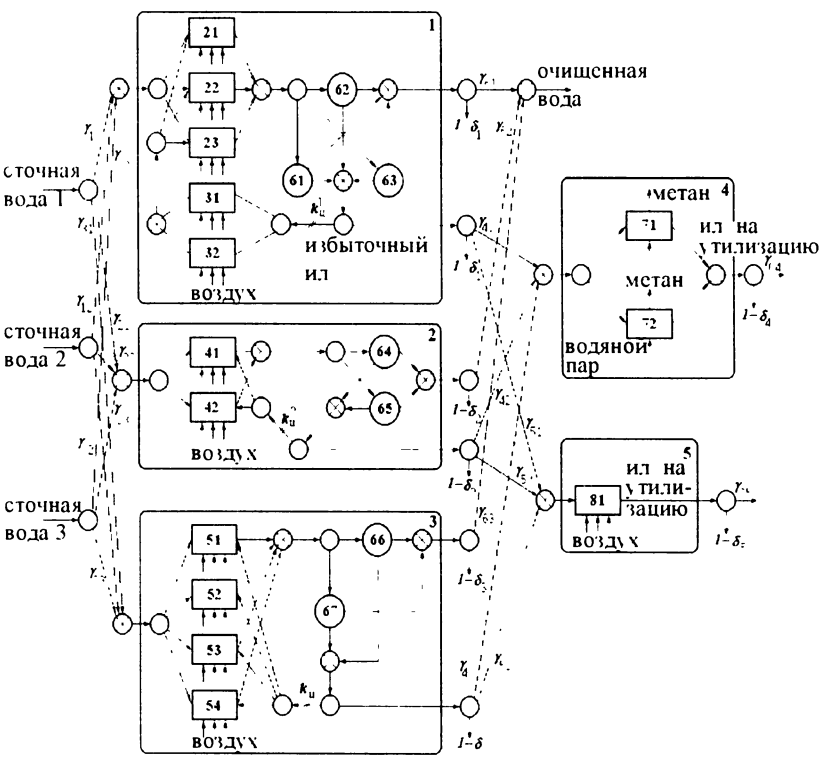


Рис 5 30 Информационная блок-схема решения задачи структурно-параметрической оптимизации установки БОСВ

Для реализации предложенного модифицированного метода синтеза к каждому из аппаратов технологической схемы подключались структурные параметры первого и второго рода, т е на вход каждого аппарата был поставлен смеситель потоков, а на выход – делитель потоков, который часть потока ($1-\delta_k$) выводит из схемы, а остальную часть распределяет между другими аппаратами

В качестве критерия оптимальности, как и в задаче 1, были приняты эксплуатационные затраты Критерий был модифицирован включением в каждое слагаемое множителя, соответствующего структурному параметру второго рода

Критерий имеет вид

$$F = c_в\left(\sum_{i=1,2,3}\delta_i G_i + \delta_5 G_5\right) + c_{рец}\sum_{i=1,2,3}\delta_i v_i^{рец} + c_п\delta_4 v_4 -$$
$$- c_м\delta_4 v_м - c_и\left(\delta_5 v_5 + \delta_4 v_4\right)$$

В качестве поисковых переменных задачи были выбраны структурные параметры *первого рода* γ_{ij}, структурные параметры *второго рода* δ_k, расходы воздуха в аэротенках и регенераторах схемы

Полный список поисковых переменных приведен в таблице 5 6

Таблица 5 6 Полный список поисковых переменных

Переменная	Назначение параметра
$\gamma_{11},\gamma_{21},\gamma_{31}$	Доли потока промышленного стока, направляемые в первый, второй и третий блоки
$\gamma_{12},\gamma_{22},\gamma_{32}$	Доли потока бытового стока, направляемые в первый, второй и третий блоки
$\gamma_{13},\gamma_{23},\gamma_{33}$	Доли потока ливневого стока, направляемые в первый, второй и третий блоки
$G_1^{аэр},G_2^{аэр},G_3^{аэр}$	Расходы воздуха, подаваемые в аэротенки первого, второго и третьего блоков
$G_1^{рег},G_2^{рег},G_3^{рег}$	Расходы воздуха, подаваемые в регенераторы первого, второго и третьего блоков
$k_{ц1},k_{ц2},k_{ц3}$,	Доли потока уплотненного ила поступающие в регенераторы первого, второго и третьего блоков
$\gamma_{41},\gamma_{42},\gamma_{43}$	Доли потока избыточного ила, поступающие на блок метантенков из первого, второго и третьего блоков
$\gamma_{51},\gamma_{52},\gamma_{53}$	Доли потока избыточного ила, поступающие на аэробную стабилизацию из первого, второго и третьего блоков
$\delta_1,\delta_2,\delta_3,\delta_4,\delta_5$	Наличие в схеме 1, 2, 3, 4, 5 блоков

На значения структурных параметров первого рода были наложены ограничения типа равенств и неравенств

$$\gamma_{4i} + \gamma_{5i} = \delta_i,\ i = \overline{1,3},\ \ 0 \le \gamma_{ij} \le 1,\ j = \overline{1,5},\ i = \overline{1,3},$$

$$\sum_{k=1}^{3} \gamma_{jl} = 1,\ i = \overline{1,3},\ \ \gamma_{i1} + \gamma_{i2} + \gamma_{i3} \le 3\delta_i,\ i = \overline{1,3},$$

$$\gamma_{i1} + \gamma_2 + \gamma_3 \le 3\delta_i,\ i = \overline{4,5}$$

Кроме ограничений, накладываемых на структурные параметры первого рода γ_{ij}, в задачу были добавлены ограничения, отражающие требования к качеству очистки сточной воды

– на предельно допустимый сброс взвешенных веществ, сбрасываемых в водоем с очищенной водой

$$c_x\left(v_{\text{вых}} x - x^{\text{ПДС}}\right) \le 0,$$

– на предельно допустимый сброс загрязнений, сбрасываемых в водоем с очищенной водой

$$c_j\left(v_{\text{вых}} s_j^{\text{в}} - s_j^{\text{ПДС}}\right) \le 0,$$

– на содержание загрязнения в сбрасываемой в водоем очищенной воде

$$\bar{c}_j\left(s_j^{\text{в}} - \bar{s}_j^{\text{ПДК}}\right) \le 0,$$

– ограничения на расход воздуха

$$\sum_{i=1,2,3,5} G_i \le G^{\max},\ G_i \ge G_i^{\min},\ i = 1,2,3,5$$

Ограничения на концентрацию биомассы в потоке уплотненного ила

$$x_{\text{отс}}^i \le x_{отс}^{\max},\ i = 1,2,3,$$

и на расход потока избыточного или, поступающего в метантенк $v_{\text{осад}}$, м^3/ч

$$v_{\text{осад}} \le 0{,}6$$

Значения границ для ограничений приведены в таблице 5 7

Табчица 5 7 Предельно допустимый сброс (ПДС) и предельно допустимая концентрация (ПДК) загрязнений с очищенной водой

$S_{\text{ХПК}}^{\text{ПДС}}$, г$O_2$/ч	$S_{\text{фенолы}}^{\text{ПДС}}$, г/ч	$S_{\text{СПАВ}}^{\text{ПДС}}$, г/ч	$S_{\text{гликоли}}^{\text{ПДС}}$, г/ч	$x^{\text{ПДС}}$, г/ч
668250	13,4	905,8	846,4	17968,5
$S_{\text{ХПК}}^{\text{ПДК}}$, мг$O_2$/л	$S_{\text{фенолы}}^{\text{ПДК}}$, мг/л	$S_{\text{СПАВ}}^{\text{ПДК}}$, мг/л	$S_{\text{гликоли}}^{\text{ПДК}}$, мг/л	$x_{\text{отс}}^{\max}$, г/л
90	0,009	0,61	0,57	11

Ограничения на расход воздуха имеют вид

$$\sum_{i=1,2,3,5} \delta_i G_i \le G^{\max}, \; G_i \ge G^{\min}, \; i = 1,2,3,5$$

Значения границ для ограничений, накладываемых на расход воздуха, приведены в таблице 5 8

Таблица 5 8 Минимальные расходы воздуха, необходимые для обеспечения перемешивания жидкости

Блок	1	2	3
$G^{\min}$, м^3/ч	8945	4400	8800

Ограничения типа неравенств, которые налагаются на структурные параметры второго рода δ_i, для нулевой вершины имеют вид

$$0 \le \delta_i \le 1, \; i = \overline{1,5}$$

Поскольку задача состоит в выборе одного блока биологической очистки и одного способа переработки избыточного ила, целесообразно включить следующие равенства, отражающие логические условия

- выбора одного блока биологической очистки

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1,$$

- выбора одного блока переработки осадка

$$\delta_4 + \delta_5 = 1$$

Решение задачи

Характеристики стоков для задачи даны в таблице 5 9

Таблица 5 9 Характеристики стока, поступающего на очистку

Сток	Объемный расход, м^3/ч	Концентрация загрязнений			
		ХПК$_{общ}$, мгО$_2$/л	Фенолы, мг/л	СПАВ, мг/л	Гликоли, мг/л
Ливневый	10	100	0,01	1,0	0,5
Бытовой	150	259	0,1	0,5	0,0
Промышленный	535	845	7,3	14,1	250

Как и для задачи параметрической оптимизации в качестве условно-разрываемых для каждого блока были выбраны потоки рециркулируемого ила, поступающие на входы регенераторов

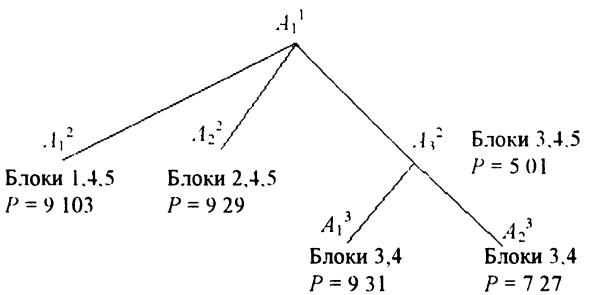
Для расчета технологической схемы применялся квазиньютоновский метод Бройдена, совмещенный с методом простой итерации

Решение задачи структурно-параметрической оптимизации проводи-

лось по алгоритму метода ветвей и границ, предложенному в разделе 5 6 4 Ветвления проводили на схеме, представленной на рис 5 30 которая использовалась в качестве гиперструктуры

Учитывая постановку задачи, в вершине A_1^1 было построено три потомка, каждый из которых включал один блок биологической очистки и оба блока переработки избыточного ила В результате сравнения нижних границ потомков была выбрана вершина A_3^2, как имеющая наименьшую нижнюю оценку В ней было построено два потомка, среди которых наименьшую нижнюю границу имеет вершина A_2^3 На этом процесс ветвлений был исчерпан Граф ветвлений представлен на рис 5 31

Оценки критерия в вершинах приведены в таблице 5 10 Полученная оптимальная схема установки биоочистки приведена на рис 5 32



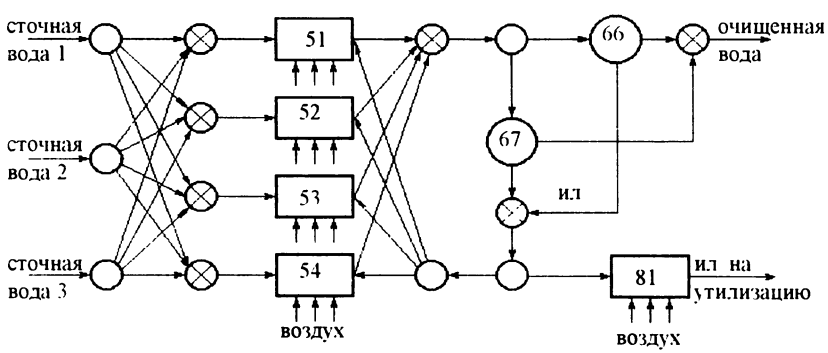


Рис 5 31 Граф ветвлений задачи
Рис 5 32 Оптимальная схема установки БОСВ

Значение критерия F=7 27 условных руб/ч

Подача сточной воды равномерно-распределенная

Расход воздуха на каждый аэротенк, совмещенный с регенератором активного ила, м^3/ч

$$G_{51} = 3300,\ G_{52} = 3300,\ G_{53} = 3300,\ G_{54} = 3300$$

Доля потока уплотненного ила, рециркулируемого в систему, равна 0 78

Таблица 5 10 Оценки вершин графа ветвлений задачи

Вершина	Значение структурных параметров второго рода					Нижние оценки
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	
A_1^2	1	0	0			9 103
A_2^2	0	1	0			9 291
A_3^2	0	0	1			5 01
A_1^3	0	0		1	0	9 31
A_2^3	0	0		0	1	7 27
Результаты ветвления вершины A_1^2						
	1	0	0	1	0	11 055
	1	0	0	0	1	9 23
Результаты ветвления вершины A_2^2						
	0	1	0	1	0	9 999
	0	1	0	0	1	9 292

Значения структурных параметров γ_{ij}, в оптимальной вершине приведены в таблицах 5 11–5 12

Таблица 5 11 Результаты решения задачи структурно-параметрической оптимизации

Сток	Доли потока сточной воды в аппараты			
	Номера аэротенков			
	51	52	53	54
Промышленный	0 25	0 25	0 25	0 25
Бытовой	0 25	0 25	0 25	0 25
Ливневый	0 25	0 25	0 25	0 25

Таблица 5.12. Качество очистки, обеспечиваемое оптимальной схемой

Количество загрязнений в очищенной сточной воде				
ХПК, $гO_2$/ч	Фенолы, г/ч	СПАВ, г/ч	Гликоли, г/ч	Взвешенные вещества, г/ч
41680	6,05	326,65	236,30	6950
Концентрации загрязнений в очищенной сточной воде				
$ХПК_{общ}$, $мгO_2$/л	Фенолы, мг/л	СПАВ, мг/л	Гликоли, мг/л	Взвешенные вещества, г/л
60	0,0087	0,47	0,34	10

Анализ оптимальной схемы на структурную устойчивость

Полученная оптимальная схема анализировалась на чувствительность к изменению характеристик сточной воды, поступающей на очистку, и рассчитывался режим работы полученной схемы, обеспечивающий требуемое качество очистки при минимальных эксплуатационных затратах. Вычислительный эксперимент включал решение двух задач.

Задача 1 – увеличение расхода промышленных стоков, поступающих на очистку, при неизменных концентрациях загрязнения в сточной воде.

Задача 2 – увеличение концентраций загрязнений в промышленной сточной воде при неизменном расходе стока, поступающего на очистку.

Каждая из задач представляет собой задачу нелинейного программирования. В качестве поисковых переменных на каждом этапе выбирались расходы воздуха в каждый из аэротенков, регенераторов, аэробный стабилизатор и доля потока, рециркулируемого в систему уплотненного ила.

Задача 1. Расход промышленной сточной воды варьировался в интервале от 500 до 700 $м^3$/ч. При этом состав сточной воды оставался неизменным (см. таблицу 5.6). На рис. 5.31 приведены графики изменения качества очищенных сточных вод, выраженного в ХПК, концентрации фенола и взвешенных веществ в очищенных стоках. Из приведенных графиков следует, что при увеличении расхода сточной воды происходит в первую очередь нарушение предельно-допустимой концентрации по взвешенным веществам. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит нарушение ПДК по фенолу и далее – по ХПК. Следовательно, концентрация по взвешенным веществам выступает как лимитирующий показатель качества. Таким образом, полученная оптимальная технологическая схема БОСВ структурно устойчива к увеличению нагрузки по сточным водам в пределах 15,8 % от номинальной нагрузки (535 $м^3$/ч).

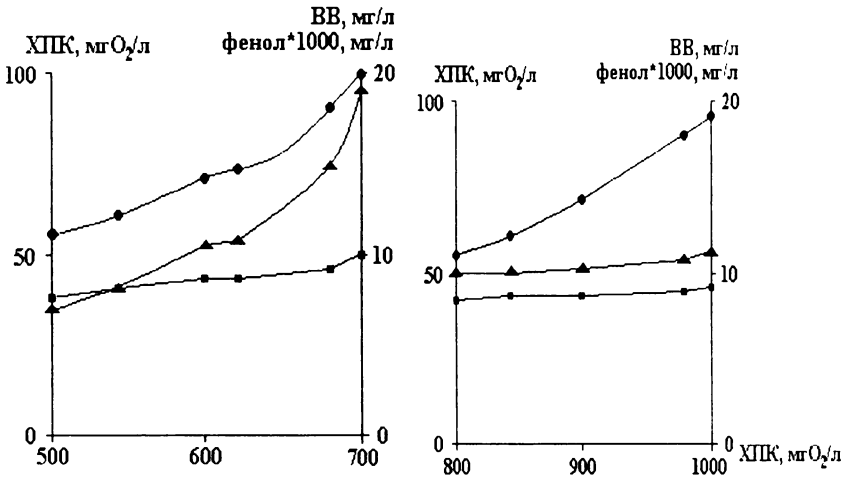


Рис 5 31 Влияние расхода сточной воды на входе на качество очистки

♦ – концентрация сточных вод в ХПК, мгO2/л, ▲ – концентрация взвешенных веществ в сточной воде мг/л

■ - концентрация фенола в сточной воде, 1000, мг/л

Рис 5 32 Влияние ХПК воды на входе на качество очистки

Обозначения те же, что и на рис 5 31

Задача 2. Варьировалась концентрация обобщенного показателя загрязнений промышленной сточной воды, выраженная в ХПК, в пределах от 800 до 1000 мгO2/л. В данном случае, предельно-допустимые концентрации были нарушены одновременно по ХПК и фенолу (рис 5 32) Технологическая схема структурно устойчива к увеличению степени загрязнения по ХПК в пределах 15,9 % от номинального значения ХПК равного 845 мгO2/л

Аналогичные расчеты были проведены при варьировании концентраций фенола, СПАВ, гликолей Результаты приведены в таблице 5 13

Таблица 5 13 Лимитирующие показатели качества (ЛПК)

Изменяемый показатель сточной воды	Расход	ХПК	Фенол	СПАВ	Гликоли
Предельные нагрузки, %	15.8	15.9	14.5	16.1	18.0
ЛПК	ВВ	Фенол ХПК	Фенол	СПАВ	Гликоли

Таким образом, проведенный вычислительный эксперимент показал, что полученная оптимальная схема обладает структурной устойчивостью при изменении нагрузок по расходу и концентрациям загрязнений в сточной воде в пределах 15-18 % от номинальных

Глава 6

Подготовка сточных вод для повторного использования

6.1. Запасы пресных вод и потребление их в промышленности

Согласно расчетам, общие запасы поверхностных и подземных пресных вод на территории России составляют 0,9 млн км^3, в том числе запасы воды в руслах рек – 150 км^3 К возобновляемым водным ресурсам относят те воды, которые ежегодно восстанавливаются в процессе круговорота воды на Земле, водообмена между сушей и океаном Водный баланс нашей планеты считается замкнутым, поскольку нет каких-либо объективных данных, свидетельствующих о сколько-нибудь значительных в нашу эпоху потерях влаги при взаимодействии между атмосферой и космосом или, наоборот, о поступлении вод из земных недр Величина возобновляемых водных ресурсов, в которую входят ежегодно возобновляемые ресурсы не только рек, но и также озер, ледников и подземных вод, составляет 4740 км^3/год

Интенсивное развитие промышленности, сельского хозяйства и коммунального хозяйства сопровождается соответствующим ростом водопотребления Динамика роста фактического и расчетного потребления воды из природных источников народным хозяйством России в 20 веке приведена в табл 6 1, динамика водопотребления наиболее водоемкими отраслями промышленности в 1980-е гг – в табл 6 2

Таблица 6 1 Динамика водопотребления в России (км^3 год)

Водопотребитель	Годы								
	1900	1940	1950	1960	1970	1980	1985	1990	2000 (прогноз)
Промышленность	1,0	6,0	10	28	65	102	116	111	120
Сельское и рыбное хозяйство	40	70	80	100	135	170	200	220	240
Коммунальное хозяйство	1,6	3,0	3,5	5,0	8,0	20	25,0	30,0	45,0
Всего	42,6	79,0	93,5	133	208	292	341	361	405

Из общего количества используемой промышленностью свежей воды 90,2% расходуется на производственные нужды, 6,8% – на хозяйственно-питьевые нужды и 3% – на вспомогательные цели Из отраслей промышленности самой водоемкой является электроэнергетика, на долю которой приходится до 70% всего промышленного водопотребления

В Европейской части России наибольшее количество воды забирается из рек, относящихся к бассейну Волги По данным на конец 1990-х гг

Таблица 6.2 Потребление воды наиболее водоемкими отраслями промышленности (в км^3)

Отрасли промышленности	Забрано из природных источников			Использовано					
	1980 г	1985 г	1988 г.	всего/свежей воды			из систем оборотно-последовательного водоснабжения		
				1980 г.	1985 г	1988 г.	1980 г.	1985 г.	1988 г
Электроэнергетика	46,2	42,6	68,0	122,6/46,5	143,5/51,0	194,8/60,3	76,1	92,4	134,5
Топливная	3,6	1,9	5,6	7,6/3,6	6,8/2,5	16,9/2,9	4,0	4,2	14,0
Черная металлургия	5,8	5,2	4,5	31,9/5,8	38,5/5,8	39,0/4,6	26,1	32,7	34,4
Химическая и нефтехимическая	6,9	5,3	5,3	34,4/6,9	42,0/6,3	43,9/5,3	27,5	35,6	38,6
Цветная металлургия	1,7	2,0	2,7	5,5/1,6	8,3/1,8	13,2/2,2	3,9	6,5	11,0
Машиностроение и металлообработка	4,8	2,8	3,0	11,1/4,8	12,1/4,2	13,8/4,3	7,9	11,1	9,6

сброс в речную сеть Волги составил почти ¾ от количества забранной воды (23 и 31 км^3, соответственно)

Тем не менее, несмотря на значительный ущерб речному стоку, водохозяйственный баланс Волги в настоящее время оценивается положительно

6.2. Требования к воде, используемой в технологических процессах

Вода в разных отраслях промышленности служит в качестве химического реагента или промышленного сырья, среды, в которой протекают те или иные химические реакции, средства для поддержания определенных технологических параметров, компонента энергетических систем, средства для транспортирования сырья, продукции, отходов и т д

В качестве химического реагента воду применяют в реакциях гидролиза, присоединения, разложения и т д Так, при взаимодействии с водой оксидов серы, азота и фосфора, фторо- и хлороводорода образуются кислоты серная и сернистая, азотистая и азотная, фосфорная, фтористоводородная, хлороводородная (соляная)

Свойство воды растворять различные газообразные соединения используют не только в технологии основных производств, но и в системах очистки газов, получивших название абсорбционных Из всех известных жидких поглотителей термин «универсальный» в первую очередь следует отнести к воде и ее растворам.

Электролизом водных растворов получают различные продукты – в частности, широко используемые в народном хозяйстве хлор и каустик

Большинство химических реакций протекает в водных растворах, суспензиях или эмульсиях При растворении в воде вещества переходят в форму, облегчающую их дальнейшее взаимодействие с другими веществами Многие соединения, в обычных условиях достаточно инертные одно относительно другого, при растворении в воде или в водных растворах энергично взаимодействуют между собой Например, твердая поваренная соль (хлорид натрия) инертна к аммиаку и диоксиду углерода, а при растворении в воде эти вещества взаимодействуют с образованием осадка – бикарбоната натрия и хлорида аммония Эта реакция лежит в основе технологии получения соды Поваренная соль очень медленно взаимодействует с тетрафторидом кремния и фтороводородом, тогда как в водных растворах реакция образования фторида кремния и кремнефторида натрия протекают с высокой скоростью при обычной температуре

Вода – наиболее распространенный теплоноситель для поддержания определенной температуры в технологических системах, ее применяют в жидком или парообразном состоянии Подземная выплавка серы, например, основана на использовании перегретой воды под давлением

Современные энергетические системы, являющиеся неотъемлемой частью практически любого крупного производства, немыслимы без использования воды Ее суточный расход для крупной ТЭС исчисляется сотнями тысяч кубических метров

Воду широко применяют для транспортирования сырья, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов Практически все процессы переработ-

ки минерального сырья связаны с водой – обогащение, растворение, химические превращения, заводнение пластов (при добыче нефти и газа), удаление отходов Примером гидроудаления отходов являются замкнутые контуры для транспортирования в отвалы фосфогипса, золы, огарка и т д Таким образом, любой сброс загрязненной воды с предприятия есть не что иное, как транспортирование отходов предприятия к месту их обезвреживания, сброса, накопления или захоронения

Огромное количество воды в ряде подотраслей промышленности расходуется на отмывку продукции от примесей (например, в производстве искусственных волокон)

Приведенные примеры использования воды в технологических процессах показывают, что современной промышленности нужна вода Общим же для всех отраслей промышленности является то, что, пройдя тот или иной производственный, хозяйственный или бытовой цикл, исходная вода претерпевает различные изменения или безвозвратно теряется

Вода, поступающая из естественных или искусственных водоемов на предприятие, и вода, уходящая с предприятия в виде стоков, различаются очень существенно В первом случае речь идет о технической воде, свойства которой определяются природными особенностями данного региона (если не учитывать загрязнения водоемов отходами) Производственные стоки современной промышленности представляют собой, как это было показано выше, чрезвычайно сложные многокомпонентные системы, содержащие растворимые и нерастворимые органические и неорганические вещества, включая и токсичные

Для химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности сложность в решении проблемы рационального использования водных ресурсов и предотвращения загрязнения водоемов сточными водами обусловлена рядом причин, связанных в большей или меньшей степени с особенностями этих подотраслей Прежде всего – это огромные количества вовлекаемых в сферу производства материальных ресурсов и выпускаемой готовой продукции, а также разнообразие применяемых технологий, выпускаемой продукции и получающихся отходов Кроме того – это использование больших количеств воды для производственных целей и отсутствие технологических решений по ее замене Так, например, основные подотрасли химической промышленности насчитывают десятки тысяч наименований продукции, применяемых технологий и получающихся отходов, в том числе и жидких Как правило, при внедрении каждой новой технологии и использовании для переработки нового сырья образуются специфические отходы Поэтому стандартные решения по обезвреживанию и утилизации ценных компонентов из сточных вод и возврату очищенной воды в производство здесь практически невозможны

Генеральным направлением должно стать создание таких технологических систем в масштабах отдельных производств, цехов, предприятий и целых промышленных комплексов, в которых осуществляется многократное использование воды без каких-либо выбросов загрязненных стоков в водоемы, а добавление исходной воды связано только с необходимыми

технологическими переделами и естественными потерями В связи с этим основой проектирования промышленного водообеспечения должны стать

– разработка новых технологических процессов, характеризующихся значительным сокращением потребления исходной воды и образования загрязненных стоков или полным исключением воды из технологических операций,

– реализация локальной обработки сточных вод от отдельных узлов производства с утилизацией ценных компонентов и подготовкой воды для повторного использования,

– организация систем оборотного водоснабжения, включающая использование паводковых вод и атмосферных осадков, отводимых с территории предприятия

Требования к качеству используемой для производственных нужд воды в каждом конкретном случае зависят от ее назначения и технологического оборудования Если вода на предприятии контактирует с продуктами производства (например, служит для извлечения и транспортирования примесей), то допустимое количество взвешенных веществ и их гидравлическую крупность устанавливают, исходя из технологических требований

Создание замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий должно базироваться на результатах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обеспечивающих рациональное использование воды во всех технологических процессах, максимальную утилизацию компонентов сточных вод, сокращение капитальных и эксплуатационных затрат, нормальные санитарно-гигиенические условия работы обслуживающего персонала, исключение загрязнения окружающей среды

Как показывает практика, иногда без достаточных оснований к показателям воды для производства различных продуктов предъявляют идентичные требования Так, по существовавшим нормативам в воде, используемой в производстве неорганических пигментов, лимитируется только солесодержание оно не должно превышать 100 мг/л Однако исследования показали, что на качество получаемого продукта влияет не только солесодержание, но и жесткость воды, при этом для производства различных пигментов эти показатели имеют разные значения Например, для получения высококачественного диоксида титана требуется вода с солесодержанием не более 20 мг/л и жесткостью не более 0,1 мг-экв/л, тогда как для получения разных марок пигментов массового производства пригодна вода с солесодержанием 50 - 4000 мг/л и жесткостью – 0,5 - 20 мг-экв/л (в этом случае появляется возможность последовательного использования воды)

Распространенность воды в природе, низкая стоимость подачи ее на производство и практика сброса использованной воды в водоемы привели к распространению так называемых мокрых технологий Однако в ряде случаев мокрая технология может быть заменена безводной Поэтому использованию воды в производстве должны предшествовать рассмотрение и оценка применения безводной технологии

Что касается охлаждающей системы, то здесь необходима предварительная технико-экономическая проработка возможности и целесообразности использования следующих технологических операций

– рекуперация теплоты технологических жидкостей и растворов, обеспечиваемой теплообменом между холодным и горячими потоками,

– утилизация теплоты от потоков с высокой температурой для получения (энергетического и технологического) водяного пара с использованием испарительного охлаждения,

– утилизация отводимой теплоты газообразным, жидким или твердым сырьем,

– передача избыточной теплоты на соседние предприятия,

– использование охлаждающей способности природного газа при его расширении на выходе из скважины, отвода избыточной теплоты с конечным товарным продуктом,

– использование климатических особенностей местности, где располагается предприятие (низкие температуры наружного воздуха, ветры, холод стратосферы, вечная мерзлота, ледники, родниковые воды и т п),

– применение холодильных установок,

– применение воздушно-испарительного, двухконтурного испарительного и воздушного охлаждения

Целесообразно, в первую очередь, выполнение последней рекомендации

Основное преимущество аппаратов воздушного охлаждения (АВО) перед градирнями, брызгальными бассейнами и прудами-охладителями заключается в отсутствии потерь воды на испарение и ветровой унос Охлаждающая вода циркулирует в замкнутой системе, и поэтому к оборотной воде не предъявляют таких жестких требований, как к воде в системах водяного охлаждения АВО просты и удобны в эксплуатации, могут работать в любых климатических условиях

При двухконтурном охлаждении продукт охлаждается хладагентом, представляющим собой газ (аммиак, пропан) или дистиллированную воду и т п Под давлением и под действием охлаждающей воды в холодильной станции газ изменяет свое агрегатное состояние При такой схеме теплообмена аппараты не загрязняются Если температура воды не влияет на технологический процесс, наиболее экономично испарительное охлаждение При этом увеличивается стойкость деталей к действию высоких температур (в металлургических печах, рубашках компрессоров, дизелях, печах строительной индустрии, в печах кипящего слоя и др)

Установка испарительного охлаждения работает на химически очищенной воде Теплота, отбираемая охлаждающей водой, затрачивается на нагревание воды до температуры кипения и ее испарение Охлаждающая вода в количестве 1 кг отводит $2{,}56 \cdot 10^6$ Дж теплоты вместо $4{,}2\ 10^4$ при испарительном охлаждении, что позволяет сократить расход воды в 60 раз, а также использовать теплоту образующегося пара При использовании пара потери воды в общем балансе завода составляют 10% от потерь при водяном охлаждении

При проектировании систем водяного охлаждения следует избегать применения барометрических и спрысковых теплообменников, а также паровых эжекторов для создания вакуума, особенно в тех случаях, когда имеется опасность загрязнения охлаждающей воды трудноудаляемой примесью В этих случаях следует отдавать предпочтение теплообменни-

кам поверхностного типа и вакуум-насосам. Так как процессы, в которых вода выполняет функцию экстрагента (промывка, выщелачивание, варка, обезжиривание деталей, приготовление растворов и т д), легче протекают при высоких температурах, следует рассмотреть возможность передачи части нагретой воды из систем водяного охлаждения в так называемые экстрагентные системы

Оборотные системы охлаждающего водоснабжения могут быть локальными и централизованными Выбор той или иной системы зависит от материала и условий работы охлаждающего оборудования, физико-химической характеристики охлаждаемого продукта, протяженности коммуникаций В процессе работы оборотная вода частично загрязняется охлаждаемыми продуктами, которые оказывают различное влияние на ее физико-химические свойства

Для системы водяного охлаждения, использующей очищенные сточные воды, при работе в замкнутом цикле, т е. на беспродувочном режиме, требуются специальные методы кондиционирования воды, чтобы предотвратить биологическое обрастание, солеотложение и коррозию теплообменного оборудования, а также более совершенная конструкция водоуловителей в градирнях, чтобы обеспечить максимальное снижение капельного уноса влаги (до 0,05-0,1 %). Гидроаэрозоль из градирен не должен вносить в атмосферу токсичные компоненты оборотной воды в количествах, превышающих установленные ПДК веществ в воздухе промышленной и селитебной зон

Поскольку основное количество воды как экстрагента используют для промывки сырья, полупродукта, продукта и для очистки газовых выбросов и твердых отходов, применение противоточного многоступенчатого режима позволяет резко сократить расход воды, и направлять концентрированные воды на восполнение потерь технологического раствора или регенерировать (перерабатывать) вместе с отработанными растворами

Наряду с созданием оптимального режима промывки очень важно обеспечить минимальный расход воды Если невозможно получить промывные воды с концентрацией, близкой к концентрации технологических растворов, то целесообразно сточные воды выводить из системы двумя потоками – концентрированным в небольшом объеме, который подсоединяют к технологическому раствору, и слабо загрязненным, который можно использовать в производстве без очистки или после соответствующей очистки либо сбрасывать в централизованную оборотную систему

Сточные воды от мойки оборудования и помещений при необходимости предварительно очищают от взвешенных частиц и масел, а затем сбрасывают в централизованную оборотную систему

При применении воды для очистки газов от твердых частиц процесс целесообразно проводить в замкнутом цикле Для очистки воздуха от пыли лучше использовать сухие фильтры

Образующиеся в производстве кислые, щелочные или солевые растворы следует регенерировать и перерабатывать раздельно, так же как и все образующиеся концентрированные сточные воды Сброс таких сточных вод в канализацию обусловливает высокое содержание в объединенном потоке сточных вод, поступающем на внеплощадочные очистные соору-

жения, органических соединений, не окисляющихся биохимически, и минеральных солей По сложившейся традиции иногда стремятся сточные воды отводить единым потоком, совмещая несколько процессов очистки в одном реакторе, что усложняет систему очистки сточных вод с целью их возврата в производство Между тем разделение одного технологического процесса иногда приводит к созданию самостоятельных систем использования воды и очистки сточных вод В то же время их рассмотрение в совокупности позволяет создать более рациональную (в техническом и экономическом плане) систему использования воды Очень важно исключить образование таких сточных вод, для которых нерационально использовать локальные методы очистки, а очистка на внеплощадочных сооружениях связана с необходимостью их значительного разбавления

На станциях химической водоочистки целесообразно предусматривать рекуперацию регенерированных сточных вод или, с учетом технологии основного производства, использовать регенерационные и другие растворы например, растворы, содержащие поваренную соль, – для подземного выщелачивания каменной соли; растворы, содержащие нитрат аммония, – для получения удобрений Применение того или иного метода оценивают по технико-экономическим показателям.

Разработке системы гидротранспорта предшествует анализ возможности использования механического или пневматического транспортирования пыли, шлама, золы При необходимости использования воды систему проектируют оборотной Поскольку к оборотной воде систем гидротранспорта не предъявляют высоких требований, в нее следует направлять сточные воды из других систем

Централизованные замкнутые системы водоснабжения создаются для регенерации различных сточных вод, близких по химическому составу, обработку которых можно осуществлять одним и тем же способом В некоторых случаях необходима предварительная очистка одного или нескольких локальных потоков перед их объединением со всеми остальными сточными водами

Иногда в зависимости от условий на предприятии можно организовать несколько оборотных централизованных систем В общем виде замкнутая система водного хозяйства промышленного предприятия включает

– локальные оборотные (замкнутые) системы,

– централизованные замкнутые системы,

– охлаждающие локальные (централизованные) оборотные (замкнутые) системы, а также системы последовательного использования воды в двух или нескольких технологических операциях с передачей ее из одной оборотной системы в другую Эти замкнутые системы разрабатывают на основе данных о количестве и характере используемой воды, отводимых сточных вод и отработанных технологических растворов в каждой технологической операции,

– хвостовые установки, которые необходимо иметь в замкнутых бессточных и безотходных системах водного хозяйства, именно они позволяют сделать систему замкнутой К ним относятся установки переработки и утилизации концентрированных отработанных технологических растворов, обезвоживания и сушки осадков, установки стабилизационные и де-

минерализационные, а также установки сжигания Наличие этих установок усложняет и удорожает систему, которая по существу представляет собой химико-технологический комплекс (цех) для производства чистой воды Кроме повышенных капитальных и эксплуатационных затрат необходимы новое высокопроизводительное оборудование (механического обезвоживания, обессоливания и др), приборы КИПиА и, соответственно, высококвалифицированный обслуживающий персонал В этом случае цех водоснабжения из второстепенного становится основным

Для создания замкнутой системы требуется проработка не только ее отдельных частей (чистых и грязных оборотных циклов, локальных сооружений по очистке стоков и др.), но и всех элементов водного хозяйства в их взаимосвязи Действительно, в системе очищают и используют все ливневые воды, на хвостовых установках перерабатывают все отходы от локальных и общезаводских циклов. Все это должно быть увязано в единое хозяйство

6.3. Требования к качеству воды, используемой в оборотных системах водоснабжения

Требования к качеству воды, используемой для производственных нужд различных предприятий, в каждом конкретном случае зависят от ее назначения и технологического оборудования Однако основным условием является освобождение воды от взвешенных частиц – грубодисперсных и коллоидно-дисперсных В природной воде содержание нерастворенных веществ обычно составляет 100-1500 мг/л и изменяется по сезонам года В водах некоторых поверхностных водостоков оно достигает 3000-10000 мг/л Взвесь и коллоидно-дисперсные компоненты природных вод образованы частицами глины, песка, лесса, мела, гидроксидов железа и алюминия, нерастворимыми гуминовыми веществами, фито- и зоопланктоном Размеры этих частиц и скорости их осаждения в воде приведены в табл 6 3

Таблица 6 3 Размеры, скорость и продолжительность осаждения частиц во взвешенном состоянии в воде

Частицы	Размеры частиц, мм	Скорость осаждения, мм/с	Время осаждения на глубину 1 м
Песок			
крупный	1	100	10 с
средний	0,5	50	20 с
мелкий	0,1	7	2,5 мин
Ил	0,05-0,027	1,7-0,5	10-30 мин
Мелкий ил	0,01-0,005	0,07-0,017	4-18 ч
Глина	0,0027	0,005	2 сут
Тонкая глина	0,001-0,0005	0,0007-0,00017	0,5-2 мес
Коллоидные частицы	0,0002-0,000001	0,000007	4 года

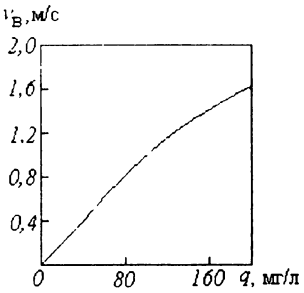


Рис 6 1 Зависимость допустимой концентрации взвеси в охлаждающей воде q от скорости движения воды в теплообменных аппаратах $v_в$

Если вода, используемая на предприятии, контактирует с продуктами производства (например, используется для извлечения и транспортирования примесей), то допустимое количество взвешенных веществ и их гидравлическую крупность устанавливают в каждом отдельном случае, исходя из технологических требований При этом скорость движения воды должна исключать возможность осаждения взвесей на всем пути потока

Допустимая концентрация взвеси в охлаждающей воде, циркулирующей в оборотных системах водоснабжения, в первую очередь зависит от скорости движения воды в теплообменных аппаратах (рис 6 1) Если содержание взвеси превышает допустимый предел, то оборотную и подпиточную воду очищают от взвешенных частиц

Следует учитывать, что взвешенные частицы, накапливающиеся в оборотной воде теплообменных систем, являются центрами кристаллизации солей жесткости и одновременно служат цементирующей основой для отложения карбоната кальция на стенках теплообменных поверхностей и трубопроводов

Оборотная вода теплообменных систем водоснабжения, так же как и вода, используемая в последовательно включенных системах прямоточного водоснабжения, должна сохранять термостабильность, т е нагревание не должно приводить к выделению на теплообменных поверхностях отложений карбонатов кальция и магния Поскольку содержание карбонатов в воде определяется условием равновесия

$$2HCO_3^- \leftrightarrow 2CO_3^{2-} + H_2O,$$

то кристаллизация солей жесткости на поверхностях теплообмена происходит в результате снижения растворимости CO_2 при нагревании и улетучивания части CO_2 на градирнях в процессе охлаждения воды (уменьшение парциального давления CO_2)

В большинстве оборотных систем теплообменного водоснабжения карбонатная жесткость воды должна находиться в пределах 2-7 мг-экв/л и, как правило, составлять 2,8-3 мг-экв/л Для оценки термостабильности оборотной воды применяют шестибальную шкалу (табл 6 4)

Вода не должна вызывать коррозии углеродистой стали и других металлов, используемых в теплообменной аппаратуре и коммуникациях Для оценки коррозионной стойкости металлов применяют десятибальную шкалу (табл 6 5) Данные, характеризующие коррозионную активность оборотной охлаждающей воды по отношению к углеродистой стали, приведены в табл 6 6

Таблица 6 4 Шестибальная шкала термостабильности воды

Группы термостабильности	Скорость карбонатных отложений		Термостабильность, баллы
	г/(м^2·ч)	мм/мес	
I – совершенно термостабильная	0	0	1
II – термостабильная	0,3	0,1	2
	0,3-1,0	0,1-0,5	3
III – ограниченно	1,5-3	0,5-1	4
термостабильная	3-15	1-5	5
IV – нетермостабильная	15	5	6

Содержание растворимых солей (щелочных металлов, магния) в оборотной воде возрастает пропорционально коэффициенту ее упаривания При этом увеличивается и коррозионная активность воды, причем коррозия материалов теплообменных систем в мягкой воде, содержащей растворенный кислород, существенно выше, чем в жесткой воде такой же степени минерализации, что связано с меньшей буферной емкостью мягких вод

Таблица 6 5 Десятибальная шкала коррозионной стойкости металлов в воде

Группа стойкости металла в воде	Скорость коррозии, г/(м^2·ч)	Проницаемость коррозии, мм/год	Коррозионная стойкость, баллы
I – совершенно стойкие	< 0,0009	< 0,001	1
II – весьма стойкие	0,0009-0,0045	0,001-0,005	2
	0,0045-0,009	0,005-0,01	3
III – стойкие	0,009-0,045	0,01-0,05	4
	0,045-0,09	0,05-0,1	5
IV – относительно стойкие	0,09-0,45	0,1-0,5	6
	0,45-0,9	0,5-1	7
V – малостойкие	0,9-4,5	1-5	8
	4,5-9,1	5-10	9
VI – нестойкие	> 9,1	> 10	10

В отсутствие ингибиторов предельно допустимое содержание солей в оборотной воде должно быть не выше 2 кг/м^3, хотя в отдельных случаях минерализация оборотной воды достигает 3 кг/м^3

Органические вещества и соединения биогенных элементов (азота, фосфора), являются питательной средой для микроорганизмов, вносимых в систему со свежей водой Для предотвращения интенсивного биологического обрастания сооружений и аппаратов теплообменных оборотных систем водоснабжения содержание этих веществ в оборотной, а следовательно, и в подпиточной воде должно быть сведено к минимуму

Таблица 6 6 Данные для ориентировочной оценки агрессивности (коррозионности) обо ротной охлаждающей воды по отношению к углеродистой стали

Показатели	Показатели для слабо-агрессивной воды*	Условия увеличения агрессивности	Показатели	Показатели для слабо-агрессивной воды*	Условия увеличения агрессивности
Суммарное содержание Cl^- и SO_4^{2-}, мг/л	≤ 100	> 100	Карбонатная жесткость воды, мг-экв/л	> 2,5 6-9	< 2,5 6 или 9
Общее содержание растворенных солей (сухой остаток), мг/л	≤ 500	> 500	Содержание растворенного кислорода, мг O_2/л	4-6	> 6

* Коррозионная стойкость металла 5-6 баллов

Таблица 6 7 Требования к качеству воды в охлаждающей системе оборотного водо снабжения (рекомендуемые значения)

Показатели качества	В России			В США
	ВНИИ-водгео	азотная промышленность	хлорная промышленность	
Температура, ^0C	25-40	28-30	25-30	-
Общая жесткость, г-экв/м^3	≤ 7	1,5-2,5	5,5	-
Карбонатная жесткость, г-экв/м^3	≤ 2,5	1,5-2,5	≤ 3	2,5-5,0
Щелочность, г-экв/м^3	3-4		2-4	2,5
Общее солесодержание, г/м^3	1300-2000	1200	800-1200	500
Окисляемость перманганатная, гO_2/м^3	≤ 20	≤ 15	8-10	-
ХПК, г O_2/м^3	≤ 200	-	70	75
Взвешенные вещества, г/м^3	≤ 50	20-30	10-20	5
Масла и смолообразующие вещества, г/м^3	≤ 20	0,3	0	-
Поверхностно-активные вещества (ПАВ)	Не нормированы	0	0	-
Анионы, г/м^3				
хлориды (Cl^-)	150-300	До 350	150-300	500
сульфаты (SO_4^{2-})	350-500	>> 500	350-500	200
фосфаты (в пересчете на PO_4^{3-})	-	>> 6	1,5-9	-
азотосодержащие соединения (в пересчете на аммиак)	6	≥ 2,4	0,12-2,4	-
Ионы тяжелых металлов, г/м^3	-	-	0	-
Растворенный кислород, г O_2/м^3	-	-	6-8	-
Остаточный активный хлор, г/м^3	До 1,0	-	До 1,0	-
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5

Допустимая скорость биологических обрастаний теплообменных аппаратов не должна превышать 0,07 г/(м^2·ч), скорость увеличения толщины слоя не должна превышать 0,05 мм в месяц Из сопоставления требований к качеству оборотной воды в теплообменных системах водоснабжения, приведенных в табл 6 7, видно, что несмотря на значительное расхождение оценок допустимых пределов общей жесткости, солесодержания, концентрации взвешенных веществ, эти требования имеют много общего в отношении наиболее важных показателей, определяющих термостабильность и интенсивность биообрастаний в оборотной воде(карбонатная жесткость, pH, содержание биогенных элементов, ХПК) На основании этих данных вырабатываются требования к воде, используемой для компенсации потерь в оборотных системах теплообменного водоснабжения (стабилизационный сброс оборотной воды с целью продувки системы, капельный унос воды с воздухом из градирен, испарение, потери при фильтровании взвесей и по различным производственным причинам) Необходимое количество подпиточной воды ($Q_п$) рассчитывают по материальному балансу оборотной системы.

$$Q_п = Q_{ун} + Q_{сб} + Q_{пр\,п} + Q_{исп},$$

где $Q_{ун}$ – вода, уносимая ветром из градирен в виде капель, $Q_{сб}$ – оборотная вода, сбрасываемая для продувки, $Q_{пр\,п}$ – производственные потери воды, $Q_{исп}$ – вода, испаряющаяся на градирне

Допустимое содержание солей или отдельных ионов других веществ в подпиточной воде $C_п$ определяется условием сохранения постоянства состава оборотной воды, циркулирующей в системе

$$Q_п C_п = (Q_{ун} + Q_{сб} + Q_{пр\,п}) C_{об},$$
$$C_п = C_{об}(Q_{ун} + Q_{сб} + Q_{пр\,п})/Q_п.$$

Средние потери воды от испарения составляют около 2,5%, от капельного уноса на градирнях 0,3-0,5%, продувочный сброс колеблется от 6 до 10% и в среднем может быть принят равным 8% Остальные потери принимаются равными ≈ 1% от объема оборотной воды

Требования к качеству подпиточной воды оборотных систем приведены в табл 6 8 При использовании для подпитки систем сточных вод пресной воды вместо свежей эти воды должны полностью отвечать тем же требованиям

Перевод оборотных систем водоснабжения на режим, не требующий стабилизированного сброса оборотной воды для продувки, позволяет сократить объем воды для подпитки систем по крайней мере в три раза и соответственно уменьшить как общие, так и эксплуатационные затраты на водоподготовку Однако в замкнутых оборотных системах водоснабжения к подпиточной воде, как видно из табл 6 8, предъявляют более жесткие требования

При замене природной воды для подпитки оборотных систем сточными водами требуется выбор достаточно крупного (по масштабам сброса) источника сточных вод с относительно постоянной характеристикой за-

грязнений Таким требованиям удовлетворяют в первую очередь биологически очищенные смеси городских и промышленных сточных вод Основные показатели этих сточных вод приведены в табл 6 9 Из таблицы следует, что по важнейшим характеристикам подпиточной воды (жесткость, общее солесодержание, содержание хлоридов и сульфатов, концентрации биогенных элементов и ХПК) биологически очищенные городские воды не отвечают требованиям к подпиточной воде для замкнутых систем и нуждаются в дополнительном обессоливании На многих предприятиях химической и нефтехимической промышленности в биологически очищенных сточных водах значение ХПК достигает 150-200 г $O_2/м^3$, а солесодержание превышает 2500 г/м^3

Поэтому при использовании биологически очищенных промышленных и городских сточных вод в системах оборотного водоснабжения химических предприятий требуется доочистка очищенных сточных вод как от оставшихся органических загрязнений, так и от солей. Степень такой доочистки зависит не только от минерализации и величины ХПК очищенных сточных вод, но и от числа продувок оборотных систем, конструкции теплообменников и гидродинамического режима движения жидкости

При увеличенном стабильном сбросе и использовании смеси в оборотных системах сточных и природных вод можно ограничиваться относительно несложной доочисткой сточных вод, например фильтрованием При использовании в оборотных системах интенсивных теплообменников современных конструкций и организации замкнутых систем оборотного водоснабжения, как видно из сопоставления данных табл 6 8 и 6 9, биологически очищенные сточные воды необходимо освобождать от органических веществ, частично обессоливать и подвергать более или менее глубокому умягчению.

Таблица 6.8. Требования к качеству воды для подпитки теплообменных систем оборотного водоснабжения в химической промышленности

Показатели качества	Оборотная вода	Подпиточная вода	
		при работе со сбросом 8% воды (с продувкой)	при работе без сброса оборотной воды (замкнутый цикл)
Карбонатная жесткость, г-экв/м^3	2,5	2	0,9
Постоянная жесткость, г-экв/м^3	5	4	1,9
Общее солесодержание, г/м^3	1200	900	445
Хлориды (Cl^-), г/м^3	300	237	112
Сульфаты (SO_4^{2-}), г/м^3	350-500	277-395	119-187
Сумма фосфора и азота, г/м^3	3	2,4	1,1
Взвешенные вещества, г/м^3	30	23,6	11,2
Окисляемость перманганатная, г $O_2/м^3$	8-15	11,8-12,8	3-5,7
ХПК, г $O_2/м^3$	70	55	26
Масла и смолообразующие вещества, г/м^3	0,3	0,25	0,10

Таблица 6 9 Санитарно-химическая характеристика биологически очищенных городских сточных вод (Украина)

Показатели качества	Сточные воды	
	в Киеве	в г Первомайске (Харьковская область)
ХПК, г $O_2/м^3$	35-40	35-40
Общее солесодержание, г/$м^3$	400-600	1300-1500
Общая жесткость, г-экв/$м^3$	5-6	7,5-8,5
Катионы и анионы, г/$м^3$		
натрий и калий (Na^+, K^+)	-	250-280
хлориды (Cl^-)	90-100	400-420
сульфаты (SO_4^{2-})	120-140	220-240
фосфаты (PO_4^{3-})	0,8	6,7-13,5
Аммиак и соли аммония (в пересчете на аммиак), г/$м^3$	0,73	2,8-8,8

Гигиеническая оценка очищенных сточных вод. Особенностью замкнутых водооборотных систем, использующих очищенные стоки, является обязательный учет их токсикологической и эпидемиологической характеристик Чтобы предотвратить загрязнение воздушного бассейна и почвы в районе градирен, необходимо обеспечить минимальный унос из них капельной влаги (в обычных условиях он составляет 0,3% и более) При использовании очищенных сточных вод для пополнения систем охлаждающего водоснабжения унос не должен превышать 0,05-0,1%. Для этого применяют, в частности, конструкции градирен, разработанные во ВНИИводгео (Москва).

После очистки городские сточные воды должны быть подвергнуты всесторонней гигиенической оценке для определения органолептических, токсикологических и эпидемиологических факторов, с тем чтобы выбрать методы их доочистки. Для такого анализа разработаны «Методические указания по гигиенической оценке использования доочищенных городских сточных вод в промышленном водоснабжении» Эти указания распространяются на случаи использования доочищенных городских сточных вод (после их доочистки различными методами) как на существующих, так и на проектируемых системах производственного водоснабжения Они не распространяются на системы производственного водоснабжения пищевых и приравненных к ним предприятий, в которых использование доочищенных сточных вод запрещается

Если сточные воды направляются в системы оборотного водоснабжения с градирнями, руководствуются «Временными методическими рекомендациями по использованию очищенных городских сточных вод и смеси их с очищенными сточными водами предприятий синтетического каучука в оборотных системах охлаждающего водоснабжения с применением градирен открытого типа».

Гигиеническую оценку сточных вод проводят на основе комплексного изучения условий их использования, методов доочистки и обеззараживания, физико-химического состава, органолептических и эпидемиологиче-

ских показателей, а также степени возможной токсичности и опасности их для человека Обязательное требование такой оценки – соблюдение принципа соответствия качества доочищенных сточных вод условиям их дальнейшего применения Требования к качеству сточных вод, их доочистке и обеззараживанию должны определяться, в первую очередь, степенью контакта работающих с технической водой Помимо необходимости обеспечения эпидемиологической безопасности, гигиеническая оценка должна включать критерии, гарантирующие безвредность для человека технической воды с данным химическим составом

Органолептические исследования должны проводиться с натурными сточными водами по общепринятым методам При этом при доочистке необходимо предусматривать сравнительное изучение характера и степени изменения запаха воды, ее окраски, способности к пенообразованию

Санитарно-микробиологические методы оценки нужно выбирать с таким расчетом, чтобы по результатам анализа можно было судить об эпидемиологической безопасности сточных вод, при этом необходимо руководствоваться «Методическими указаниями по санитарномикробиологическому анализу воды поверхностных водоемов» и «Инструктивно-методическими указаниями по обнаружению возбудителей кишечных инфекций бактериальной и вирусной природы в воде»

При оценке эффективности работы сооружений по доочистке сточных вод на стадии лабораторных и опытно-промышленных испытаний, а также при неблагоприятной эпидемиологической обстановке исследуют основные и дополнительные показатели воды

Санитарно-химические методы должны давать необходимую информацию о качестве сточных вод и, прежде всего, о наличии характерного загрязнения, которое определяет специфику возможного неблагоприятного влияния таких сточных вод на человека и окружающую среду Продукты трансформации химических веществ, образующиеся при обработке сточных вод, должны определяться, как правило, на базе специализированных НИИ и гигиенических кафедр медицинских вузов

Для осуществления санитарно-химического лабораторного контроля за качеством сточных вод и выбора оптимального режима их обработки рекомендуется использовать следующие показатели БПК и ХПК, отражающие общий уровень органического загрязнения, содержание взвешенных частиц, уровень которых в значительной степени определяет эффективность обеззараживания сточных вод, содержание металлов, которые нередко определяют токсичность и опасность сточных вод, содержание специфических ингредиентов, таких как фенолы, ПАВ, нефтепродукты, а также других веществ, в зависимости от вида предприятия

При проведении исследований для оценки действия сточных вод на кожу человека руководствуются основными положениями «Методических рекомендаций по изучению кожно-резорбтивного действия химических соединений при гигиеническом регламентировании их содержания в воде».

При оценке выраженности токсического действия доочищенной воды руководствуются рекомендациями, изложенными в «Методических указа-

ниях по разработке и научному обоснованию предельно допустимых концентраций вредных веществ в воде водоемов»

Основная информация о степени опасности и токсичности сточных вод может быть получена только на основе их интегральной оценки при единых условиях постановки опытов, адекватных реальным условиям использования доочищенных сточных вод в производстве Для выявления возможного неблагоприятного влияния доочищенных сточных вод на человека требуется проведение эксперимента длительностью 6-8 мес Необходимо широко использовать интегральные оценки состояния теплокровного организма, так как сведения о характере токсического действия на организм большинства химических веществ, содержащихся в сточных водах, часто отсутствуют При использовании для доочистки и обеззараживания сточных вод сильных окислителей (озона, хлора и др) существует реальная опасность образования веществ – например, хлороформа, дихлорбромметана, дибромхлорметана, – оказывающих отдаленное воздействие на организм, т е наряду с оценкой общетоксического действия следует изучать и возможные отдаленные эффекты

При оценке способов обеззараживания предпочтение отдают тем из них, которые обладают «последействием», что исключает или ограничивает кратность повторных обработок При использовании для обеззараживания сточных вод хлора остаточный уровень его должен быть не менее 1,0 мг/л при продолжительности контакта не менее 30 мин При любом сочетании методов доочистки и обеззараживания основным условием их применения является соответствие качества доочищенной воды гигиеническим требованиям, приведенным ниже

Показатели	Допустимый уровень	Показатели	Допустимый уровень
Запах, баллы	2	$БПК_5$, мг O_2/л	3,0
Окраска, отсутствие в столбике воды, см	Не менее 10	ХПК, мг O_2/л	30,0
		Коли-индекс	100
Содержание взвешенных веществ, мг/л	3,0	Специфические ингредиенты, мг/л	ПДК

Систему доочистки сточных вод необходимо строить таким образом, чтобы гарантировать строгое обеспечение уровней всех приведенных показателей Например, обработка большими дозами хлора биологически очищенных городских сточных вод позволяет добиться соответствия их бактериологических показателей требуемым, однако после такой обработки сточные воды приобретают выраженные запах и окраску, становятся непригодными для использования в открытых системах

Наиболее опасно использование сточных вод в технологических процессах, сопровождающихся образованием аэрозолей, особенно в условиях высокой температуры окружающей среды В этом случае требования к качеству сточных вод по токсикологическим показателям должны быть максимально жесткими, уровень специфических ингредиентов не должен превышать ПДК для воздуха рабочей зоны согласно ГОСТ 12 1 005–76

«Система стандартов безопасности труда Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования».

Разработаны требования к воде, используемой для питания котлов, приведенные в табл. 6.10.

Таким образом, различные варианты использования сточных вод для технических нужд и способы их подготовки с целью создания замкнутых систем водного хозяйства должны рассматриваться отдельно для практически любого конкретного предприятия. Создание таких систем имеет преимущества не только экологические, но и, в подавляющем большинстве случаев, социально-экономические.

6.4. Способы обработки сточных вод при создании замкнутых систем водообеспечения

Способы обработки сточных вод, предназначенных для повторного использования, зависят от категории вод, направляемых на производственные нужды, и особенностей технологического процесса, в котором они будут использованы Подготовка воды заключается в регулировании ее состава и обработке для придания определенных свойств (охлаждение, стабилизация, антикоррозионная обработка)

В зависимости от характера и концентрации загрязняющих веществ, количества сточных вод, места их использования предусматривают различные способы обработки, которые должны удовлетворять ряду требований, важнейшими из которых являются: возможность регулирования свойств очищенной воды при повторном использовании, надежность работы очистных сооружений, экономическая целесообразность.

Таблица 6.10. Требования, предъявляемые к качеству технической воды

Показатели качества воды	Котлы		
	жаротрубные (0,5-1,5 МПа)	высокого давления (10-15 МПа)	прямоточные (10-15 МПа) и прямоточные сверкритического давления (21,5-30 МПа)
Общая жесткость, г-экв/м^3	0,35	0,035	0,003
Щелочность, г-экв/м	-	-	-
Диоксид кремния, г/м^3	Не нормир	0,7	0,02
Медь, г/м^3	0,5	0,05	0,005
Марганец, г/м^3	-	-	-
Железо, г/м^3	1	0,05	0,01
Кислород, г/м^3	1	0,3	0,01
Нитраты и нитриты, г/м^3	-	0,02	0,02
pH	8-10	8-10	7-8,5
Цветность, град	-	-	-
Окисляемость, г/м^3	-	-	-

Способы обработки сточных вод подразделяют на механические, химические, физико-химические, физические, биохимические (рис 6 2)

Механические способы. Взвешенные вещества удаляют из воды отстаиванием, фильтрацией, микрофильтрацией, флотацией, коагуляцией, флоккуляцией Отстаивание сточных вод – наиболее простой и экономичный метод Для повышения его эффективности усовершенствуют водораспределительные и водосборные системы, автоматизируя удаление осадка и применяя более эффективные тонкослойные отстойники

Для выделения из сточных вод грубодисперсных примесей применяют гидроциклоны, имеющие более высокую производительность Эффективность очистки сточных вод повышается при применении многоярусных гидроциклонов

К эффективным методам очистки сточных вод от взвешенных веществ относят фильтрование через зернистые и пористые материалы, сетчатые фильтры, микросетки и т д Для очистки от трудноудаляемых взвешенных веществ применяют коагуляцию, флоккуляцию, флотацию Тонкодисперсные и эмульгированные примеси удаляют в основном фильтрованием и коагуляцией Для повышения эффективности очистки сточные воды перед фильтрацией в большинстве случаев подвергают реагентной обработке, что позволяет, кроме того, регулировать технологические свойства очищенной воды Перспективным также является применение новых фильтрующих материалов, улучшение конструкций фильтров и способов регенерации фильтрующих загрузок Очистку сточных вод рассматриваемого вида эффективно проводить также электрокоагуляцией

Для удаления из производственных сточных вод масел, жиров, волокон и других веществ с развитой поверхностью можно применять флотацию, а для разделения тонкодисперсных суспензий – предварительную флоккуляцию примесей.

Физические и химические способы. От растворенных веществ минерального характера сточные воды очищают с помощью ионообменных материалов универсального или селективного назначения Для этого используют методы, основанные на образовании и удалении труднорастворимых примесей (нейтрализацию, кристаллизацию, осаждение), а также электродиализ, гиперфильтрацию Применение катализаторов (сильных окислителей) повышает эффективность окислительно-восстановительных реакций Для обессоливания воды находят применение дистилляция, гиперфильтрация, вымораживание и т д

Для устранения разнообразных органических веществ, попадающих в производственные сточные воды, используют экстракцию и сорбцию Чтобы более полно извлечь из воды растворимые органические вещества, в том числе биологически неокисляемые, применяют сорбцию на активированных углях Для обезвреживания небольших объемов высококонцентрированных сточных вод при невозможности использования других способов применяют сжигание.

Биохимические способы. От органических веществ сточные воды очищают с помощью биоокислителей (в аэротенках, на биофильтрах и т д) Эти методы предпочтительны для очистки больших количеств сточ-

Рис 6 2 Классификация способов обработки сточных вод

ных вод, при обработке производственных сточных вод вместе с хозяйственно-бытовыми. При этом важное значение имеют интенсификация насыщения воды кислородом (применение эффективных аэраторов, технического кислорода и т. д.), воздействие микроорганизмов на органические примеси (использование контактных устройств, катализаторов, различных видов микроорганизмов, новых материалов для загрузки биофильтров).

Перевод работы оборотных систем на режимы с повышенными коэффициентами концентрирования требует, как правило, стабилизационной обработки воды, позволяющей предотвращать солевые отложения, коррозию оборудования и трубопроводов, биологическое обрастание. Для борьбы с карбонатными отложениями применяют подкисление, фосфатирование, умягчение и рекарбонизацию. Коррозию предотвращают, обрабатывая воду ингибиторами на основе фосфатов, хроматов цинка, диспергаторов в различных сочетаниях. Оборотную воду периодически хлорируют, с тем чтобы предотвращать биологическое обрастание. Очистка воды от грубодисперсных примесей позволяет защитить трубопроводы от механических отложений.

6.5. Корректировка минерального состава очищенных сточных вод

На показатели эффективности замкнутых систем во многих случаях значительное влияние оказывают мероприятия по обессоливанию сточных вод, подлежащих повторному использованию. Следовательно, проектирование бессточных систем предприятий требует прогнозирования концентраций содержащихся в воде растворенных солей во всех потоках системы водоснабжения.

Для простейшего случая применимы системы локального чистого оборотного цикла с градирней, заполненной и подпитываемой водой с концентрациями компонентов C_0. Содержание этих компонентов в оборотной воде после пуска системы возрастает по экспоненциальному закону, приближаясь к предельной концентрации $C_{пр}$. Продолжительность достижения практически предельных концентраций (несколько часов) весьма невелика по сравнению с продолжительностью работы (месяцы, годы) системы оборотного цикла с предельными концентрациями компонентов в оборотной воде. Поэтому практическое значение для проектирования и эксплуатации имеют *предельные концентрации*, соответствующие установившемуся динамическому равновесию между поступлением и выводом компонентов. Это равновесие и материальный баланс компонентов описываются формулой

$$C_{пр}/C_0 = (P_1 + P_2 + P_3)/(P_2 + P_3) = K,$$

где P_1, P_2, P_3 – потери воды на испарение, капельный унос и продувку, соответственно; K – предельный коэффициент концентрирования солей (упаривания).

В рассмотренном случае C_0 является известной величиной, что позволяет рассчитать $C_{пр}$. Реальные замкнутые системы водоснабжения про-

мышленных предприятий состоят из взаимосвязанных подсистем чистых и грязных оборотных циклов, очистных стабилизационных обессоливающих установок. Для таких подсистем концентрации компонентов в подпиточной воде неизвестны (исключение составляет вода из внешних источников). Кроме того, солевой состав изменяется в результате обработки воды химическими реагентами, а также обессоливания, умягчения, поступления загрязнений от технологических процессов.

Метод расчета предельных концентраций компонентов в сложных системах оборотного водоснабжения поясним на примере определения предельной концентрации Cl^- для системы, балансовая схема которой показана на рис 6 3, а расчетная схема – на рис 6 4 Исходные данные для расчета приведены в табл. 6 11 и 6 12 В общем виде балансовое уравнение можно представить выражением

$$\sum_{i=1}^{N} q_{ik} X_i + \sum_{i=1}^{N} q_{ik} C_i + m_k = 0$$

Таблица 6 11 Массовые расходы Cl^- (m, г/ч; k – порядковый номер расчетного узла)

k	m_k	Источник m_k
4	2510	Вводится в воду в составе коагулянта
5	6500	Поступает в воду при промывке металла, протравленного в HCl

Число уравнений равно числу узлов от $У_1$ до $У_7$. В эти уравнения из табл 6.11 и 6 12 подставляют известные q_i, C_i, m, заменяют равные одна другой концентрации X_i новыми неизвестными Z_j $(1 \le j \le Z,\ Z \le N)$ и приводят уравнения к виду

$$\sum_{j=1}^{Z} a_{kj} Z_j = b_k ,$$

где a_{kj} – коэффициенты при новых неизвестных Z_j для всех узлов; b_k – свободные члены уравнений

Далее составляют матрицу для расчета неизвестных Z_j Для рассматриваемого примера получена следующая система уравнений, расположенных в порядке возрастания номеров узлов (q_i) расчетной схемы.

$$\begin{aligned}
&-q_2X_2 - q_3X_3 - q_5X_5 + q_{24}X_{24} + q_1C_1 - q_4C_4 = 0;\\
&q_5X_5 - q_6X_6 - q_7X_7 - q_9X_9 + q_{17}X_{17} - q_{18}C_{18} + q_{23}C_{23} - q_8C_8 = 0,\\
&q_9X_9 - q_{10}X_{10} - q_{11}X_{11} - q_{14}X_{14} - q_{12}X_{12} + q_{13}C_{13} = 0;\\
&q_{14}X_{14} - q_{15}X_{15} - q_{16}X_{16} - q_{17}X_{17} + m_4 = 0, \qquad (6\ 1)\\
&q_{18}X_{18} - q_{19}X_{19} - q_{20}X_{20} + m_5 = 0,\\
&q_{20}X_{20} - q_{22}X_{22} - q_{21}X_{21} = 0,\\
&q_{22}X_{22} - q_{23}X_{23} - q_{24}X_{24} + q_{25}X_{25} = 0
\end{aligned}$$

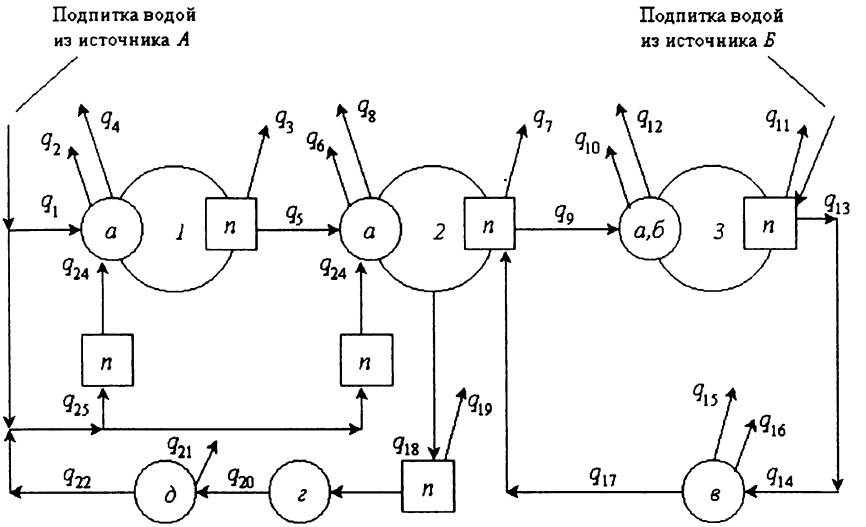


Рис 6 3. Балансовая схема водного хозяйства промышленного предприятия (к примеру расчета концентрации СГ)

1 – чистый оборотный цикл № 1 объектов энергетического хозяйства завода (производительность 2500 м³/ч), *2* – чистый оборотный цикл № 2 трубопрокатного цеха (производительность 4000 м³/ч), *3* – грязный оборотный цикл № 3 трубопрокатных цехов (производительность 3000 м³/ч), *а* – градирни, *б* – отстойники, *в* – установка для доочистки избыточных сточных вод оборотного цикла № 3 с использованием $FeCl_2$ для коагулирования, *г* – установка для нейтрализации кислых сточных вод с содержанием HCl и $FeCl_3$, *д* – обессоливающая установка, *п* – потребители воды; *q* – расход воды

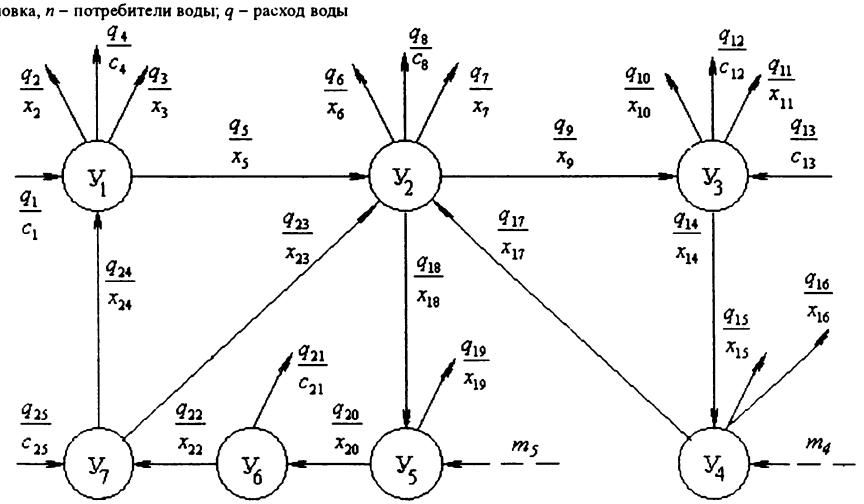


Рис 6 4. Расчетная схема водного хозяйства промышленного предприятия (к примеру расчета концентрации Cl⁻)

С учетом того, что

$$Z_1 = X_2 = X_3 = X_5, \quad Z_2 = X_6 = X_7 = X_9 = X_{18}, \quad Z_3 = X_{10} = X_{11} = X_{14},$$
$$Z_4 = X_{15} = X_{16} = X_{17}, \quad Z_5 = X_{19} = X_{20}, Z_6 = X_{22}, \quad Z_7 = X_{23} = X_{24},$$

преобразуем систему (6 1) и получим для семи неизвестных систему из семи уравнений

$$-106Z_1 + 35Z_7 = -792, \; 89Z_1 - 35Z_2 + 245Z_4 + 79Z_7 = 0,$$
$$250Z_2 - 349Z_3 = -2400, \; 251Z_3 - 251Z_4 = -2510, \qquad (6\,2)$$
$$79Z_2 - 79Z_5 = -6500, \; 77Z_5 - 76Z_6 = 8000, \; 76Z_6 - 114Z_7 = -304$$

Составляем матрицу (табл 6 13) для расчета Z_i из коэффициентов при неизвестных и свободных членах системы (6 2), имя в виду, что коэффициенты при Z_i, отсутствующих в уравнениях, равны нулю

При выполнении расчетов можно задаться требуемой концентрацией компонента в системе и рассчитать необходимое число продувок и содержание компонентов в подпиточной воде из внешних источников, а также решить другие задачи

Исходя из изложенного метода расчета, можно разработать автоматизированную систему корректировки минерального состава сточных вод для конкретного предприятия, вводя в расчетную схему математические модели, описывающие зависимость выходных концентраций компонентов от входных концентраций и других факторов, влияющих на процессы обработки и использования воды

Выбор технологической схемы обработки подпиточной воды в значительной мере определяется ее ионным составом *Ионообменную очистку сточных вод*, включающую в себя стадии сорбции и регенерации ионитов, осуществляют в аппаратах периодического или непрерывного действия Фильтр периодического действия представляет собой закрытый цилиндрический сосуд с расположенным на днище щелевым дренажным устройством, которое служит для равномерного отвода очищенной воды по всему сечению фильтра Фильтр загружают ионитом (высота слоя 1,5-2,5 м) Если сточную воду и регенерирующий раствор подают сверху, фильтр будет прямоточным, если же сточная вода поступает снизу, а регенерирующий раствор сверху – противоточным

Одним из наиболее эффективных путей улучшения технических и экономических показателей ионного обмена и усовершенствования конструкций ионитовых фильтров является непрерывный ионный обмен При этом решаются три основные проблемы непрерывность получения конечного продукта, максимальное использование ионообменного материала, оптимальное использование регенерирующих и отмывочных растворов Ионный обмен можно использовать для очистки сточных вод многих химических производств электрохимических – от ионов тяжелых металлов

Таблица 6 12 Расход воды (q, м³/ч) и концентрация Cl^- (C, г/м³)

i	C_i	X_i	q_i	Назначение q_i	i	C_i	X_i	q_i	Назначение q_i
1	8	–	99	Подпитка оборотного цикла № 1 из источника	14		X_{14}	251	Избыточная вода оборотного цикла № 3
2	–	X_2	12	Потери от капельного уноса из градирни	15	–	X_{15}	5	Потери с осадком
3	–	X_3	5	Потери в производстве	16	–	X_{16}	1	Безвозвратное потребление
4	0	–	28	Потери от испарения в градирне	17	–	X_{17}	245	Подпитка оборотного цикла № 2
5	–	X_5	89	Подпитка оборотного цикла № 2	18	–	X_{18}	79	Подача в травильное отделение
6	–	X_6	20	Потери от капельного уноса из градирни	19	–	X_{19}	2	Потери в травильном отделении
7	–	X_7	8	Потери в производстве	20	–	X_{20}	77	Подача на обессоливание
8	0	–	56	Потери от испарения в градирне	21	8000	–	1	Потери при обессоливании
9	–	X_9	250	Подпитка оборотного цикла № 3	22	–	X_{22}	76	Подпитка оборотных циклов № 1 и 2 через потребителей
10	–	X_{10}	8	Потери от капельного уноса из градирни	23	–	X_{23}	79	Подпитка оборотного цикла № 2 через потребителей
11	–	X_{11}	90	Потери в производстве	24	–	X_{24}	35	Подпитка оборотного цикла № 1 через потребителей
12	0	–	21	Потери от испарения в градирне	25	8	–	38	Подпитка оборотных циклов № 1 и 2 через потребителей
13	20	–	120	Подпитка оборотного цикла № 3 из источника					

Таблица 6 13 Матрицы для расчета Z_j

Номер уравнения k	a_{kj}							b_k
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	
1	−106	0	0	0	0	0	35	−792
2	89	−357	0	254	0	0	79	0
3	0	250	−349	0	0	0	0	−2400
4	0	0	251	−251	0	0	0	−2510
5	0	79	0	0	−79	0	0	−6500
6	0	0	0	0	77	−76	–	8000
7	0	0	0	0	0	76	−114	−304

Расчетом определены следующие значения концентрации

Z_1	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7
Вычисленное значение	10,752	32,378	30,07	40,07	114,656	10,902	9,935

и цианидов, синтетических волокон – от ионов цинка, азотных удобрений – от аммиака и меди, искусственных и естественных изотопов – от радиоактивных веществ Этот метод пригоден также для очистки промышленных сточных вод от органических соединений – фенола, анилина, ПАВ и др (рис 6 5) В качестве ионообменных материалов можно применять природные или искусственные полимерные смолы, нерастворимые в воде или органических растворителях

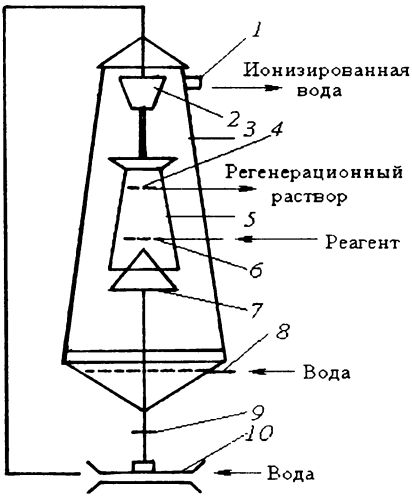
Представляет практический интерес ионообменный аппарат непрерывного действия, в котором совмещены функции аппаратов сорбции, регенерации и отмывки (рис 6 6) Он состоит из емкости для ионизации воды в виде усеченного конуса, в котором находится второй усеченный конус, где происходят процессы регенерации и отмывки

Аппарат работает следующим образом Воду подают в колонну через трубу с коническими насадками 8, где ее подвергают ионизации в псевдоожиженном слое, и выводят через перфорированную трубу *1* Отработанный ионит осаждается в нижней части колонны 9, откуда через трубчатое устройство *10* для отбора ионита эрлифтом или эжектором его подают в верхнюю часть колонны

Рис 6 5 Схема основных направлений применения ионообменной очистки сточных вод

Рис 6 6 Ионообменный аппарат непрерывного действия

1 – устройство для вывода обработанной воды из ионообменной колонны, *2* – воронка для приема истощаемого ионита, *3* – ионообменная колонна, *4* – устройство для вывода истощенного послерегенерационного раствора, 5 – емкость для регенерации ионита, *6* – устройство для ввода регенерационных растворов, *7* – регулятор скорости движения воды в регенераторе, *8* – устройство для подачи исходной воды в аппарат; *9* – устройство для отбора ионита, *10* – устройство для транспортировки топлива



В усеченный конус *5* подают регенерационный раствор, который контактирует с отработанным ионитом Двигаясь снизу вверх, навстречу иониту, регенерационный раствор истощается и выводится через кольцевую перфорированную трубу *4* Регенерированный ионит продолжает опускаться навстречу восходящему потоку воды, промывается и переходит в рабочую зону колонны *3*. После этого процесс повторяют

Аппарат прост в конструкции, компактен, экономичен в работе, надежен в эксплуатации. В нем отсутствуют регуляторы и кислотостойкая арматура Работа аппарата легко поддается автоматизации.

Технико-экономические показатели работы этого аппарата приведены ниже

Объем воды, выдаваемый фильтром, $м^3/ч$	0,33
Содержание смолы в фильтре, $м^3$	0,03
Объем фильтрованной воды, вырабатываемой в течение цикла (32 ч), $м^3$	10,54
Объем фильтрованной воды за 1 ч на 1 $м^2$ фильтра (в течение одного цикла – 32 ч), $м^3$	527
Количество 100 %-ной кислоты (на 1 $м^3$ фильтрованной воды), $г/м^3$	292
Количество регенерационного раствора (на 1 $м^3$ фильтрованной воды), $г/м^3$	0,063
Площадь фильтрации, $м^2$	0,02
Высота загрузки, м	1
Диаметр фильтра, м	0,019
Концентрация солей жесткости в регенерационном растворе, мг-экв/л	25
Кислотность регенерационного раствора, мг-экв/л	23
Количество ионита на 1 $м^2$ площади сечения фильтра, $м^3/м^2$	1,15
Объем воды на 1 $м^3$ ионита, $м^3$	352

Преимущества такого аппарата особенно ощутимы при умягчении высокоминерализованной воды, при использовании установок высокой производительности, а также в случаях затруднений со сбросом стоков, при значительных колебаниях состава исходной воды, для химических процессов, в которых важны экономия реагентов и отсутствие разбавления продукта Высокая экономичность и эффективность непрерывного процесса ионизации делают перспективным широкое использование таких аппаратов при выборе схем корректировки минерального состава при обработке воды

6.6. Борьба с биологическими обрастаниями оборотных систем

Биологические обрастания представляют собой совокупность организмов, поселившихся и развивающихся на поверхностях нагрева, охлаждаемых водой, или по тракту движений воды Эти организмы заносятся в теплообменные системы с водой из источников водоснабжения и интенсивно размножаются в благоприятных для них условиях (теплая вода, обилие питательных веществ и растворенного кислорода). Образование биологических обрастаний снижает теплопередачу и уменьшает эффективность работы градирен. При этом на внутренней поверхности труб образуются отложения, снижающие их пропускную способность и увеличивающие расход энергии на перекачку воды. Часто обрастание водорослями бывает настолько сильным, что может вызвать полное засорение системы Для роста водорослей необходим углекислый газ, а в большинстве случаев – и солнечный свет Плесень может расти как при солнечном свете, так и в его отсутствие в закрытых частях системы охлаждения

В системах промышленного водоснабжения важную роль играют нитрифицирующие и сульфатвосстанавливающие бактерии, а также железо- и сульфобактерии Нитрифицирующие бактерии имеют две разновидности одни окисляют соли аммония в нитриты, а другие – нитриты в нитраты Железобактерии ассимилируют растворенные соли железа и выделяют его в виде гидроксида железа, вызывая тем самым зарастание водопроводных труб и образование в них бугристых отложений Сульфатвосстанавливающие бактерии одновременно окисляют органические соединения и восстанавливают сернистые соединения до сероводорода, вызывая коррозию наружной, а иногда и внутренней поверхности уложенных в грунт водопроводных труб, а также загрязнение воды Они превращают элементную серу, которая может содержаться в природной воде или образовываться при окислении сероводорода, в серную кислоту, способную в дальнейшем вызывать коррозию металлических и бетонных поверхностей сооружений

В составе биологических обрастаний могут встречаться простейшие организмы – инфузории, жгутиковые, а также мшанки и гидроидные полипы Самый нежелательный обитатель трубопроводов оборотных систем – моллюск дрейсена Среди обрастаний нередки значительные количества червей, относящихся к различным систематическим группам (нематоды, олигохеты и др)

Профилактику цветения оборотной воды начинают с источника водоснабжения Для этого в водоем вводят химические препараты, например, неорганические гербициды, из которых наиболее эффективен арсенат натрия в концентрации 1-6 мг/л, вызывающий гибель многих водных растений во всей массе воды В отдельных случаях для уничтожения водной растительности успешно используют гипс, хлораты, пербораты, медный купорос и др

Для очистки водоемов и водостоков от водорослей в воду вводят полиметаллические рудные концентраты, содержащие ионы Cu, Zn, Au, Ag и конжольский концентрат, содержащий ионы Cu, Zn, Ag, Sn, Pb При введении в воду этих соединений в концентрации 3-4,5 мг/л количество водорослей через 28 дней снижается на 95-99 %

Привлекает внимание использование альгицидных свойств солей аммония, наиболее эффективными из которых являются $[Ca(NH_3)_4]Cl_2$, $(NH_4)_2CO_3 \cdot NH_4(OH)$ при концентрации 50-250 мг/л Учитывая наличие аммиака в сбросах предприятий азотной промышленности, можно полагать, что на этих предприятиях карбонаты аммония – наиболее перспективное средство борьбы с биообрастанием оборотных систем водоснабжения

Обработка воды хлором в промышленных водоемах и в оборотных системах водоснабжения – наиболее распространенный и эффективный метод устранения биологических обрастаний Для предотвращения развития бактерий в теплообменных аппаратах, трубопроводах и градирнях хлор вводят в оборотную воду периодически заданными дозами, не отключая теплообменные аппараты Необходимые дозы хлора составляют 4-10 мг/л С учетом растворимости хлора в воде эти дозы должны обеспечить остаточное содержание хлора (0,5-1 мг/л) на выходе из последних точек сети водопровода

Периодичность хлорирования определяется интенсивностью развития микроорганизмов в воде на конкретном производстве Если биообрастания образуются в результате жизнедеятельности микроорганизмов, для которых характерен быстрый рост, то продолжительность периодов подачи хлора составляет 5-15 мин, а интервалы между ними 45-55 мин Доза хлора, гибельная для насекомых, червей, нематод составляет 15-50 мг/л, а для железобактерий – 3-4 мг/л Охлаждающую воду хлорируют только после предварительной тщательной очистки аппаратов от загрязнений

Во вновь проектируемых системах оборотного водоснабжения для расчета хлораторных установок дозу хлора $D_{хл}$ следует устанавливать, руководствуясь опытом эксплуатации аналогичных систем на воде данного источника водоснабжения При отсутствии такого опыта дозу хлора (в мг/л) определяют по формуле

$$D_{хл} = П+2,$$

где П – хлоропоглощаемость воды, добавляемой в систему, мг/л

Если вычисленная по этой формуле доза хлора окажется меньше 5 мг/л, то для расчета ее следует принять равной 5 мг/л Хлоропоглощаемость воды определяют с учетом продолжительности контакта с ней хлора, равной

продолжительности прохождения воды ($T_{х\,п}$) от насосной станции до наиболее удаленного теплообменного аппарата

$$T_{х\,п} = W/Q_{охл},$$

где W – объем воды в системе по пути движения к наиболее удаленному теплообменному аппарату, включая трубопроводы и резервуары, м^3, $Q_{охл}$ – расход охлаждающей оборотной воды, м^3/ч

Хлораторы следует рассчитывать на непрерывную работу, в промежутках между периодами хлорирования раствор хлора хранят в специальных резервуарах Производительность хлораторов (в кг/ч) при наличии баков для накапливания раствора хлора определяют по формуле

$$q = Q_{охл}D_{хл}T_{х\,п}n/(24\cdot1000),$$

где n – число периодов обработки воды хлором в течение суток

Для борьбы с развитием микроорганизмов в теплообменных системах наряду с хлором применяют и другие окислители диоксид хлора, перманганат калия и др

Озонирование воды Применение озона имеет ряд преимуществ перед хлорированием Введение озона в воду не связано с образованием побочных примесей, продолжительность распада его исчисляется минутами, а действие озона на биологические компоненты обрастания в 15-20 раз активнее по сравнению с хлором При устранении микроводорослей и простейших озон более эффективен, чем хлор Доза озона 15 мг/л в течение 3 мин вызывает разрушение некоторых видов простейших организмов, устойчивых к хлорированию воды дозами 250 мг/л Результаты озонирования показали, что водоросли погибают при дозе озона 0,5-1 мг/л, а личинки моллюска дрейсены – при дозе 3 мг/л До 80% взрослых форм дрейсены погибало при 30-минутном контакте и дозе 2,2 мг O_3/л Для полной гибели таких представителей зоопланктона, как циклопы, олигохеты, дафнии, коловоротки, требуется доза озона 2 мг/л С удешевлением электроэнергии, усовершенствованием аппаратуры и технологии применения озона, внедрением автоматизации и чувствительных методов контроля, этот метод как средство борьбы с биологическими обрастаниями будет применяться все шире

Купорасование воды рекомендуется применять для предотвращения обрастания водорослями трубопроводов и холодильников охлаждающих сооружений, т е растворение в ней сульфата меди в необходимых дозах При купорасовании подавляется также развитие железобактерий (доза 0,3-0,5 мг/л), серобактерий (доза до 5 мг/л), ракушек (мидий) и мшанок (доза 0,1-0,3 мг/л) Медным купоросом можно обрабатывать воду периодически 2-4 раза в месяц [продолжительность обработки 30-60 мин, доза медного купороса 4-6 мг/л (1-1,5 мг/л в пересчете на Cu^{2+})] Медный купорос вводят в обрабатываемую воду перед поступлением ее на градирни в виде 2-5%-ного раствора, приготовляемого в растворном баке Объем бака определяют по формуле (в м^3)

$$V_р = D_к QT / (1000C\rho),$$

где $D_к$ – доза безводного медного купороса, мг/л, Q – расход обрабатываемой воды, м^3/ч, T – время подготовки раствора, ч, C – концентрация раствора, мг/л (принимается равной 2-4% по Cu^{2+}), ρ – плотность раствора (принимается равной 1 т/м^3)

Для борьбы с биологическим обрастаниями градирен, брызгальных бассейнов и оросительных холодильников, развивающимися одновременно с обрастанием водорослями, применяют, наряду с купорасованием, дополнительное периодическое хлорирование перед поступлением воды на сооружения В этом случае дозу хлора для расчета хлораторов следует принимать равной 7-10 мг/л при периодичности обработки воды хлором 3-4 раза в месяц и продолжительности каждой обработки 1 ч

Дополнительно обрабатывать воду хлором следует одновременно с обработкой ее раствором медного купороса или после нее.

Известны и другие способы борьбы с биологическими обрастаниями, например повышение температуры воды в теплообменниках до 45-50 ^{0}С в течение 5-15 мин; покрытие теплообменных поверхностей токсичными красками, битумами, которые наносят в один-два слоя на внутреннюю поверхность трубопровода, такие покрытия действуют 1-2 года, после чего их приходится обновлять

Механические отложения и некоторые виды обрастаний гидробиологического происхождения можно удалять со стенок труб и холодильников промывкой, промывкой совместно с продувкой воздухом либо механическим способом Для промывки используют ту же воду, которая постоянно циркулирует в системе, при скорости ее движения, в 2,5-4 раза превышающей скорость обычной циркуляции

Поверхности теплообмена очищают пружинными ножами и скребками, а также деревянными или резиновыми шарами, транспортируемыми по трубопроводу под давлением воды Иногда механическую очистку поверхностей дополняют химической обработкой воды для снижения интенсивности образования отложений.

Как средство борьбы с биологическими обрастаниями особый интерес представляет *метод гидроэлектрического эффекта*, основанный на изменении частоты колебания давления, в результате чего нарушается деятельность микроорганизмов

6.7. Оценка выгодности повторного использования воды

Критерий выгодности расширения повторного использования воды на объекте имеет вид

$$Э_{повт} = \Delta З_2(\Delta Q_2) + \Delta З_3(\Delta Q_3) + \Delta З_{1,4}(\Delta Q_2, \Delta Q_3) - \Delta З_5(\Delta Q_2, \Delta Q_3) \to \max,$$

$$Э_{повт} \geq 0, \quad З_5(\Delta Q_2, \Delta Q_3, \varphi) \to \min,$$

$$K_р^н = [K_р^в(Q_р - Q_2') + K_{отв}' Q_3']/(Q_р - Q_2' + Q_3') \geq [K],$$

где $\Delta З_2$ – снижение затрат на обеспечение свежей водой, $\Delta З_3$ – снижение затрат на водоотведение, $\Delta З_{1,4}$ – снижение затрат на воспроизводство водных ресурсов в источнике и обеспечение нормативов качества воды, $З_5$ – суммарные затраты на организацию водо-

обеспечения, ΔQ_2, ΔQ_3 – сокращение водопотребления и водоотведения, соответственно, $Q_р$ – расход воды в створе водозабора, $Э_{повт}$ – суммарный экономический эффект от увеличения количества воды повторного использования на объекте, φ – совокупность возможных схем реконструкции водного хозяйства на фиксированный объем сокращения потребляемой свежей воды и водоотведения, $K_р^в$, $K_р^н$, $K_{отв}$, $[K]$ – показатели качества воды в реке соответственно выше и ниже сброса сточных вод данным объектом, качества сбрасываемых сточных вод и допустимые пределы ($\geq$ - «не хуже»), Q_2' ($Q_2' = Q_2 - \Delta Q_2$), Q_3' ($Q_3' = Q_3 - \Delta Q_3$) – показатели потребления свежей воды и водоотведения после реконструкции

Исходными данными для этих расчетов служат результаты изыскательских и проектных работ.

Для группы объектов решение этой задачи требует оценки эффекта кооперирования водных хозяйств Совместимость объектов характеризуется их взаимным расположением и возможностью приемки сточных вод одного объекта в качестве источника технической воды для других Для группы из m объектов критерий оптимальности повторного использования воды (с учетом эффекта кооперации) имеет вид

$$Э_{повт}^{гр} = \left[\sum_{i=1}^{m}(\Delta З_{2i} + \Delta З_{3i} + \Delta З_{1\,4}) - \sum_{i=1}^{m} З_{5i}\right] \to \max, \quad Э_{повт}^{гр} \geq 0,$$

$$З_{5i}(\Delta Q_{2i}, \Delta Q_{3i}, \varphi_i) \to \min, \quad i = \overline{1,m},$$

$$\sum_{i=1}^{m} Q_{2i}' \geq Q_2^{гр} \geq 0, \quad \sum_{i=1}^{m} Q_{3i}' \geq Q_3^{гр} \geq 0,$$

$$K_р^н = [K_р^в(Q_в - Q_2^{гр}) + K_3^{гр} Q_3^{гр}]/(Q_р - Q_2^{гр} + Q_3^{гр}) \geq [K]$$

Зона поиска оптимума по выражению (6 3) должна быть ограничена условием, что ни на одном из объектов, включаемом в группу, показатели выгодности не должны ухудшаться по сравнению с автономным вариантом:

$$Э_{повт\,i}^{гр} \geq Э_{повт\,i},$$

где $Э_{повт\,i}^{гр}$ - эффект для i-го объекта по оптимальному варианту решения, $Э_{повт\,i}$ - результат решения по тому же объекту

В связи с этим для отдельных предприятий повторное использование воды может заключаться только в приеме сточных вод от других объектов В этом случае необходимого экономического эффекта достигают устранением платы за сброс сточных вод и потребление речной воды При оценке целесообразности применения для технического водоснабжения очищенных городских сточных вод схема анализа сохраняется Для предприятий учитывают эффект сокращения затрат на забор свежей воды из источников для коммунального хозяйства Через экономические показатели регулирования и перераспределения речного стока и очистки сточных вод выявляют обратную связь между водностью реки и экономической эффективностью повторного использования воды в промышленности, что наиболее существенно для бассейнов малых рек

Бессточные промышленные узлы можно создать на базе повторного использования очищенных сточных вод (коммунальных, промышленных или их смесей) с включением городских поселков, промышленных и других объектов, объединенных по принципу полного или частичного последовательного использования подготовленных сточных вод для технического водоснабжения промышленных предприятий Формирование таких промышленных узлов разной степени сложности определяют технико-экономическими расчетами, исходя из оценки эффективности повторного использования сточных вод в соответствии с состоянием и перспективой развития централизованных систем канализации городов, структурой промышленности, требованиями к качеству технической воды, комплексом сооружений по доочистке сточных вод, дополняющих стандартные технологические схемы их очистки

Состав объектов, включаемых в состав промузлов, определяется рядом факторов· характером выпускаемой продукции, использованием технической воды и условиями эпидемиологической безопасности, ситуационным положением предприятий и объектов, существующими и перспективными условиями водоотведения с предприятий, состоянием систем очистных сооружений (локальной, полной, общезаводской, общегородской), мощностью источника водоснабжения для повторного использования доочищенных сточных вод

Промышленный узел с замкнутой системой водопользования формируют по трем схемам 1) по линейной схеме (от одного предприятия к другому) передачи очищенных отработанных сточных вод, 2) по узловой схеме передачи очищенных отработанных сточных вод через прудосветлитель, где происходит усреднение качественного состава отработанных вод, 3) по смешанной схеме (линейно-узловой) Состав очистных сооружений при линейной схеме передачи очищенных сточных вод выбирают с учетом водохозяйственного баланса предприятия, принимающего воды Если поступающее количество воды меньше требуемого, то дополнительную подпитку осуществляют свежей водой либо очищенной сточной водой другого предприятия При этом степень доочистки промышленного узла определяют с учетом последующего разбавления свежей водой или же по качеству смеси очищенных сточных вод

6.8. Условия выбора схем водообеспечения

При изучении условий водообеспечения промышленного узла по узловой схеме качество исходной воды оценивают по качеству смеси очищенных сточных вод, сбрасываемых в отстойник-накопитель, в соответствии с их объемом по каждому предприятию и со схемой подачи свежей воды для покрытия безвозвратных технологических потерь Требуемое количество свежей воды определяют как сумму безвозвратных потерь на каждом предприятии, входящем в промышленный узел

Схему подачи свежей воды для компенсации безвозвратных технологических потерь выбирают по результатам технико-экономических расчетов, учитывая при этом возможность разбавления в пруду-осветлителе всего объема поступающих очищенных стоков от локальной или общей систе-

мы доочистки, возможность разбавления, после локальной доочистки, смеси очищенных отработанных вод перед подачей их отдельным предприятиям, а также возможность подачи только свежей воды в требуемом объеме отдельным предприятиям, от которых очищенные сточные воды поступают в пруд-осветлитель.

Для предприятий, сточные воды которых после механической или биологической очистки сбрасывают в водоем или совместно с хозяйственно-бытовыми стоками передают на городские сооружения биологической очистки, при этом технологическая вода не требует специальной подготовки или же последнюю применяют в ограниченном объеме для корректировки минерального состава, выбор основных методов и сооружений для доочистки очищенных сточных вод с целью их повторного использования рекомендуется проводить с учетом данных табл 6 14 Схемы компоновки основных сооружений доочистки можно разделить на три основные группы К первой группе (рис 6 7*а*) относятся схемы безреагентной механической доочистки (включающие микрофильтры и фильтры), которые можно эксплуатировать в комплексе одну с другой или раздельно Вторую группу (рис 6 7*б*) используют при необходимости реагентного осветления и умягчения воды Для выбора оптимального варианта схемы необходимо определять эффект снижения мешающих загрязнений после каждого этапа доочистки Третью группу схем (рис 6 7*в*) применяют, когда возникает необходимость, помимо реагентной обработки стоков, использовать ионные методы умягчения и опреснения (обессоливания) воды

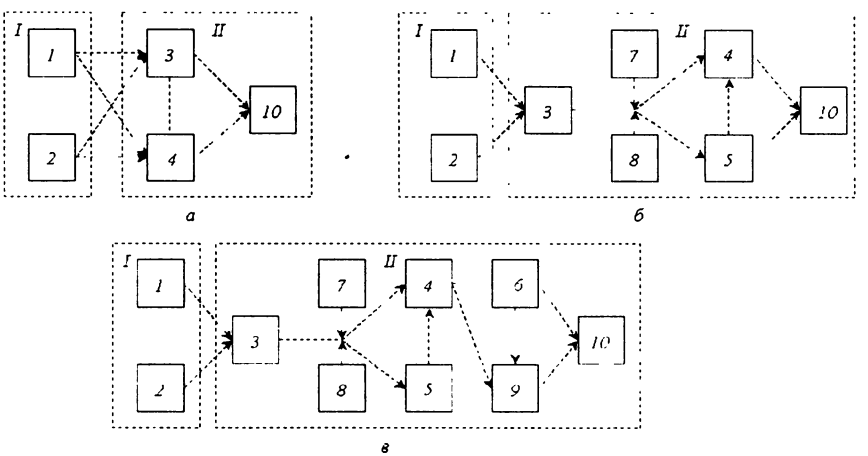


Рис. 6.7. Возможные схемы компоновки основных сооружений доочистки и подготовки сточных вод к повторному использованию.

I – блок очистки, II – блок доочистки и подготовки воды, *1* – механическая очистка; *2* – полная биологическая очистка или доочистка в биопрудах, *3* – микрофильтрация, *4* – фильтрация, *5* – флотация, *6* – адсорбция на угольных фильтрах, *7* – коагуляция (реагентное хозяйство), *8* – декарбонизация (реагентное хозяйство), *9* – умягчение и опреснение ионным методом, *10* – хлорирование Остальные пояснения в тексте

Комплекс сооружений подбирают также, как и во второй группе Выбор схем формирования бессточных промышленных узлов, методов доочистки сточных вод, состава очистных сооружений и схем их компоновки должен быть обоснован технико-экономическими расчетами.

6.9. Имитационное моделирование формирования качества сточных вод

Среди многочисленных факторов, обусловливающих качество природных вод, следует выделить промышленные стоки С целью защиты природных вод от загрязнения промышленными стоками строятся дорогостоящие очистные сооружения и системы контроля сточных вод Эффективность капиталовложений зависит от оптимальности принятых проектных решений, в частности от расчета мощностей очистных сооружений, рационального выбора аппаратуры контроля, а также от качества принимаемых решений в процессе эксплуатации очистных сооружений, максимального использования их возможностей Для успешного решения этих задач очень важно иметь четкое представление о процессе формирования качества сточных вод, уметь предсказывать его развитие во времени с учетом всевозможных критических ситуаций, возникающих в процессе функционирования предприятия Имитационные модели формирования качества сточных вод дают возможность предсказывать качество сточных вод в динамике в зависимости от заданного режима работы предприятия, не нарушая нормального режима его функционирования Для разработки таких моделей необходима следующая исходная информация

– подробная схема взаиморасположения источников загрязнения, связанных канализационной сетью данного предприятия,

– расход воды для каждого источника загрязнения и концентрация сбрасываемых ингредиентов во всех возможных технологических режимах функционирования,

– рабочие модели распространения загрязняющих ингредиентов на рассматриваемом участке канализационной сети,

– вид и характер случайной составляющей процесса загрязнения для источников сбросов

Имитационные модели формирования качества сточных вод, кроме указанного, позволяют 1)косвенно контролировать работу автоанализаторов качества вод путем сопоставления результатов моделирования и измеренных значений одноименных параметров, 2)при временном выходе из строя какого-либо канала измерения в автоанализаторе заполнять пробелы в измерениях данного параметра, рассчитывать концентрации контролируемых ингредиентов в неконтролируемой точке водного объекта в соответствии с условиями спуска сточных вод источниками загрязнения (это позволяет сократить до минимума необходимое число автоанализаторов, требуемых для контроля водного объекта с заданной достоверностью), 3)рассчитывать ПДС для объектов загрязнения с целью поддержания концентрации контролируемых ингредиентов в заданной точке водного объекта в зависимости от условий спуска сточных вод источников сброса,4)обнаруживать источники аварийных сбросов,5)испытывать, согласо-

Таблица 6.14. Возможные направления доочистки и повторного использования сточных вод в различных отраслях промышленности

Отрасли народного хозяйства и предприятия, которые могут принять сточные воды для использования	Отрасли народного хозяйства, от которых поступают сточные воды																	Смесь производственных и городских сточных вод
	Электроэнергетика	Свиноводческие заводы	Производство жженой извести	Сернокислотное производство минеральных удобрений	Производство каустической соды	Лакокрасочные заводы	Производство полиэтилена	Производство винилацетата	Производство сульфатной целлюлозы	Производство целлюлозы	Производство печатной бумаги	Производство талового масла	Производство сульфатного скипидара	Литейные заводы	Станкостроительные заводы	Производство керамических блоков	Производство кровельного картона	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Электроэнергетика																		
обмыв водоподогревателей,	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	156	156	1	1	+
химическая водная отмывка	+	+	+	31	+	31	+	+	+	+	+	+	+	156	156	1	2(1)	31
						(14)								+	+	1	+	+
Черная металлургия	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–	1	1	1(2)
агломерационные фабрики, доменное и сталеплавильное производство,	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	1(2)	+
прокатное производство, трубные заводы	+	+	+	+	+	+	156	+	6	6	+	+	+	+	+	1	+	+

Продолжение табл. 6.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ферросплавные заводы, коксохимические производства	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	1	+	+
Метизное пр-во																		
вода IIи III кат	-	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	1	1(2)	+
промывная вода гальванических цехов	3156 -	31 (14)	156	31	156	31	156	156	6	6	6	31(14)	31(1)	+	1	31(14)	156	4
огнеупорное про-во		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+
Цветная металлургия																		
свинцовое и титано-магниевое пр-ва,	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	1	+	+
глиноземные алюминиевые з-ды,	-	+	1	+	+	-	156	-	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+
электродные з-ды	-	+	+	+	+	+	156	+	6	6	+	+	+	+	+	1	+	-
Нефтеперерабатывающие заводы	31	+	156	1	156	+	156	156	6	6	+	1(15)	1	+	1	1	1	-
Производство СЖК																		
техническая вода,	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	+	15	15	156	16	156	56
вода для барометрических конденсаторов	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	154	15	6 15 6	156	16	156	56
Производство синтетического каучука	15	15	15	15	15	1	15	15	+	+	-	15	15		1	15	15	5
Заводы резиновой промышленности	156	+	1	1	1(15)	1	156	1	6	6	-	1(15)	15	1	15	1	15	+
Сернокислотное производство	31	31	-	+	+	-	156	156	6	6	-	-	-	156	-	1	-	-

Прооолжение табл 6 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Пр-во целлюлозы																		
сульфатная																		
– небеленая	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	15	15	156	156	16	156	56
– беленая	3156	3156	156	156	156	316	156	156	4	6	6	154	154	156	156	16	156	56
сульфитная																		
– небеленая	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	15	15	156	156	16	156	56
– беленая	3156	3156	156	156	156	316	156	156	4	6	6	154	154	156	156	16	156	56
бисульфитная	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	15	15	156	156	16	156	56
З-ды нефтехимич машиностр	31	31	31	31 (14)	31 (14)	31	31 (154)	31 (154)	4	4	4	154	154	154	154	31(14)	4	54
Пр-во суперфосфата и аммофоса	31	31	+	+	+	31	156	156	6	6	+	+	+	+	+	1	1	+
Пр-во нитроаммофоски	3156	3156	156	1	156	316	156	156	6	6	6	154	154	156	156	1	1	4
Пр-во эпоксидных смол	3156	15	1	1	15	31	156	156	6	6	6	15	15	156	156	1	15	5
Пр-ва кальцинированной соды, желтого фосфора, сложных удобрений, вискозной текстильной нити	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+
Пр-во древесной массы	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	+	+	156	156	31(14)	156	56
Пр-во бумаги и картона	3156	3156	156	156	156	316	156	156	6	6	6	15(1)	15	156	156	1	1	56
Джутоканатные фабрики	31	31	-	-	+	31	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-

Приложение табл 6.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Станкостроительные заводы и литейное пр-во																		
вода II кат ,	31	31	+	1	31(14)	31	156	+	6	6	+	1	1	156	156	1	1	+
вода III кат	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Пр-во абразивных шлиф материалов	31	31	31 (14)	31 (154)	31	31	156	31	6	6	4	154	154	154	154	31(14)	1	54 (31)
Пр-во абразивного инструмента	315 6	31	156	156	156	316	156	156	6	6	6	154	156	156	156	16	16	56
Заводы тяжелого и энергетического машиностроения	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+
Строительно-дрожное машиностроние	+	+	+	+	+	+	+	31	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+
Приборостроительные заводы																		
вода техн , вода для	31	31	+	1	+	31	156	31	6	6	+	15(1)	15	1	1	1	1	54
гальванических цехов	315 6	31 56	156	156	156	316	156	156	6	6	6	156	156	156	156	16	16	56
Заводы автомобильной прстн																		
обмыв изделий,	+ 315	31	+	+	+	+	156	+	6	6	+	15	15	+	+	1	1	+
повторно используемые стоки	6	31	156	31 (14)	156	31	156	156	6	6	6	154	154	156	156	31(14)	1	54

Продолжение табл 6 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Электротехнические заводы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Пр-во керамических блоков и труб	1	+	1	1	+	1	+	+	-	+	-	1	1	+	1	1	1	-
Пр-во кровельного картона и рубероида	31 56	31	156	+	156	31	156	156	6	6	-	1	15	+	+	1	-	54
Пр-во санитарно-технического оборудования	31 56	31	156	31(14)	156	31	156	156	6	6	6	154	154	156	156	1	16	54
Стекольное пр-во	1	-	+	+	1(15)	+	1	+	+	+	+	1	1	+	+	1	+	-

Примечания. I В скобках указан возможный вариант доочистки и подготовки воды для повторного использования II Сточные воды целлюлозно-бумажной промышленности (графы 12-17) после предварительной фильтрационной доочистки III Городские сточные воды (графа 19) представлены после предварительной фильтрационной доочистки IV Все сточные воды после доочистки и водоподготовки (хлорированы) V Необходимость применения коагулянтов и стабилизационной обработки воды определяется в каждом конкретном случае VI Производственные сточные воды предприятий черной и цветной металлургии используют на собственные нужды или передают (за исключением глиноземного производства) для повторного использования только на предприятия данной отрасли

Условные обозначения. Цифры в тексте таблицы Значок + означает отсутствие дополнительной доочистки, 1 – фильтрационная доочистка; 2 – флотационная доочистка, 3 – умягчение реагентным методом, 4 – умягчение ионным методом, 5 – адсорбционная доочистка, 6 – ионный метод опреснения Таким образом, сочетание цифр 156 означает, что очищенные сточные воды подвергаются реагентному умягчению (возможно, с коагулированием при одновременном обесцвечивании и осветлении), фильтрации, адсорбционной доочистке (при БПК 7 мг/л), ионному опреснению (обессоливанию), а сочетание 154 означает, что вода поступает на фильтрационные установки (возможно с предварительным микрофильтрованием и коагулированием), адсорбционную доочистку и катионитовые фильтры

вывать, оптимизировать техническое, информационно-программное и математическое обеспечение разрабатываемой автоматизированной системы контроля качества природной воды, что значительно повышает эффективность таких разработок и сокращает до минимума время их внедрения на реальном объекте

С целью унификации алгоритмов и программ имитационные модели должны разрабатываться по блочно-модульному принципу с оптимальным разделением функций между блоками, имитирующими разные процессы загрязнения, путем перестройки порядка выполнения и минимальной замены разработанных блоков.

Представляется целесообразным наличие в имитационных моделях следующих основных четырех блоков

– блок генерации технологических режимов работы источников сбросов, т е блок управления,

– блок реализации математических моделей распространения примесей в воде,

– блок генерации многомерных случайных процессов, имеющих заданный характер,

– блок генерации случайных чисел по заданному закону распределения

Ниже приведена имитационная модель процесса загрязнения сточных вод Одесского припортового завода Для простоты изложения моделирование рассмотрим на примере наиболее характерного участка завода На рис 6 8 направления стрелок, соединяющих автоанализатор качества воды и источники загрязнения (И1. И5), соответствуют направлению потока воды, T_1, T_2, T_3, T_4 – узловые точки канализационной сети; источники И1, И2 – сбрасывают аммиак, И3, И4 – аммиак и карбамид, И5 – аммиак, карбамид, азотнитриты, азотнитраты, фосфаты На рис 6 9 приведена программная структура имитационной модели процесса загрязнения воды Стрелками на рисунке указано направление обращения между блоками

Как почти любой реальный процесс, формирование качества сточных вод является сложной динамической и стохастической системой В качестве динамических математических моделей распространения примесей в воде используются модели, учитывающие лишь процессы разбавления и самоочищения

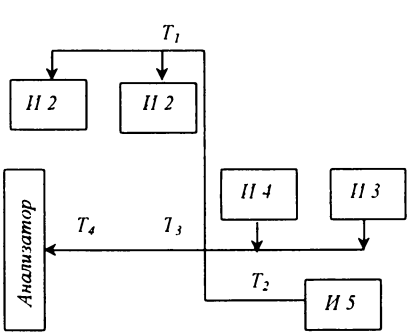
$$y_p^k(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{q_k} y_{p,j}(t-\tau_j) + x_p(t) \ \text{ при } p=1, \\ \frac{1}{\sum_{j=1}^{q_k} y_{1,j}} \left[\sum_{j=1}^{q_k} y_{1,j}(t-\tau_j) \cdot y_{p,j}(t-\tau_j) \right] + x_p(t) \ \text{ при } p=2, \ \ ,m, \end{cases}$$

где $y_p^k(t)$, $p = 2,. \ ,m,$ – концентрация p-го ингредиента в k-м узле, q_k – число источников сбросов, участвующих в формировании качества воды в k-м узле, $y_{p_j}(t)$ – концентрация

p-го ингредиента, сбрасываемого j-м объектом сбросов, τ_l – время добегания воды от j-го объекта сбросов до k-го узла, $x_p(t)$ – стохастическая составляющая концентрации p-го ингредиента

Известно, что марковская модель является наилучшей для гидрологических данных Предполагается, что она пригодна также для данных о загрязнении воды Проведенное исследование по натурным данным Одесского припортового завода подтвердило это предположение, поэтому в предлагаемых ниже моделях стохастическая составляющая концентрации загрязняющих веществ $x(t) = (x_1(t), \ldots, x_m(t))$ моделируется методом группового моделирования многомерных нормальных марковских процессов с заданной глубиной связности

В блоке генерации технологических режимов работы источников загрязнения (рис 6 9) формируется массив весовых коэффициентов концентрации сбрасываемых ингредиентов от источников загрязнения $K = (k_1, \ldots, k_5)$ Элементы вектора K удовлетворяют соотношению $0 \le k_i \le 1$ Случай $k_i = 0$ соответствует выходу из строя, т е отключение соответствующего источника загрязнения, $k_i = 1$ соответствует максимальному загрязнению i-м источником Из рис 6 10 видно, что *исходными данными*, как для данного блока, так и для всей программы имитационной модели процесса загрязнения являются M – количество моделируемых ингредиентов, M_1 - количество источников загрязнения, N_1 – количество моделируемых режимов работы источников загрязнения, KN – количество анализаторов качества контролируемой воды, N – глубина связности моделируемого марковского процесса, a_i, $i = 1,L$ – концентрация аммиака для i-го источника загрязнения, L – количество источников загрязнения, сбрасывающих аммиак; b_i, $i = 1,L_1$ – концентрация карбамида для i-го источника загрязнения, L_1 – количество источников загрязнения, сбрасывающих карбамид, C – концентрация фосфата, d – концентрация азотнитрита, e – концентрация азотнитрата, Q_i, $i = 1,M$ – расход воды для i-го источника загрязнения, τ_i, $i = 1,M$ – время, за которое вода достигает анализатора T_4 от i-го источника загрязнения, K_{1ij}^2, $i = 1,N_1$, $j = 1,M_1$ – матрица задания режимов работы источников загрязнения, n_1 – шаг дискретного моделиро-



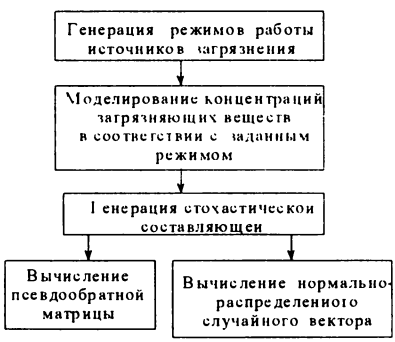


Рис 6 8 Условная схема моделируемого участка Одесского припортового завода
Рис 6 9 Программная структура имитационной модели процесса загрязнения воды

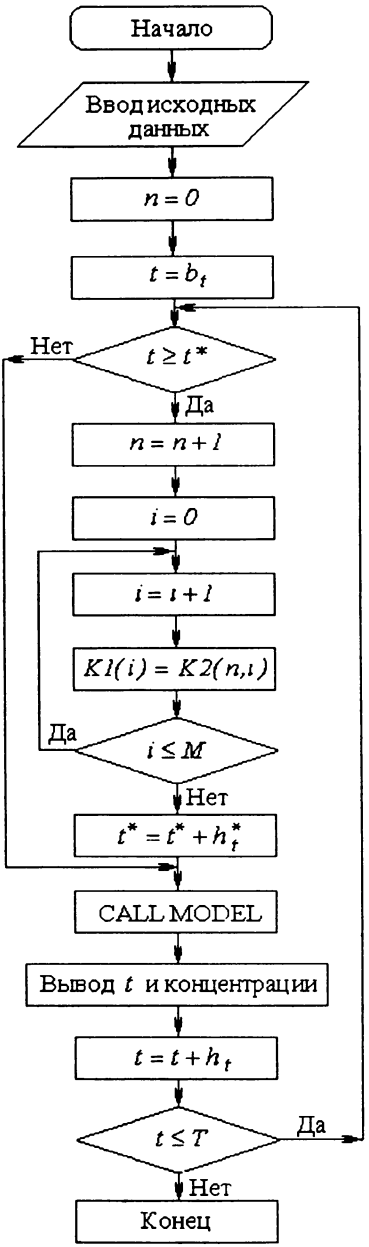


Рис 6 10 Блок-схема алгоритма моделирования режимов работы источников загрязнения

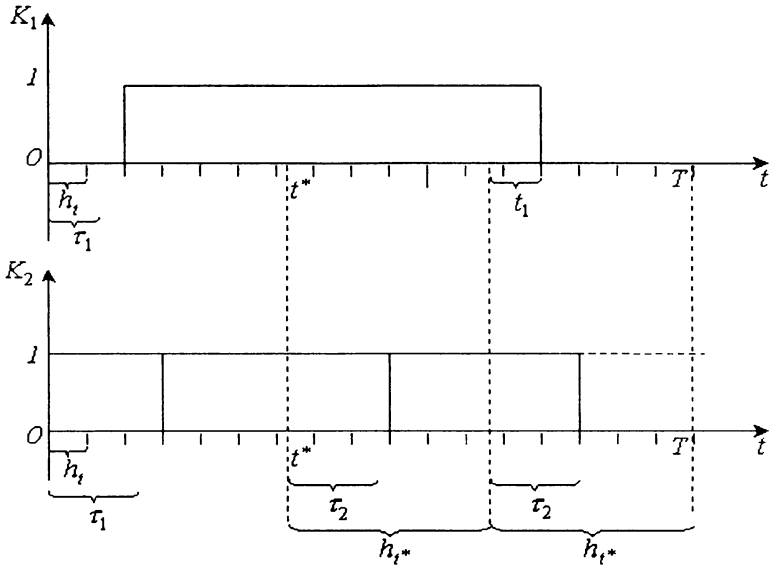
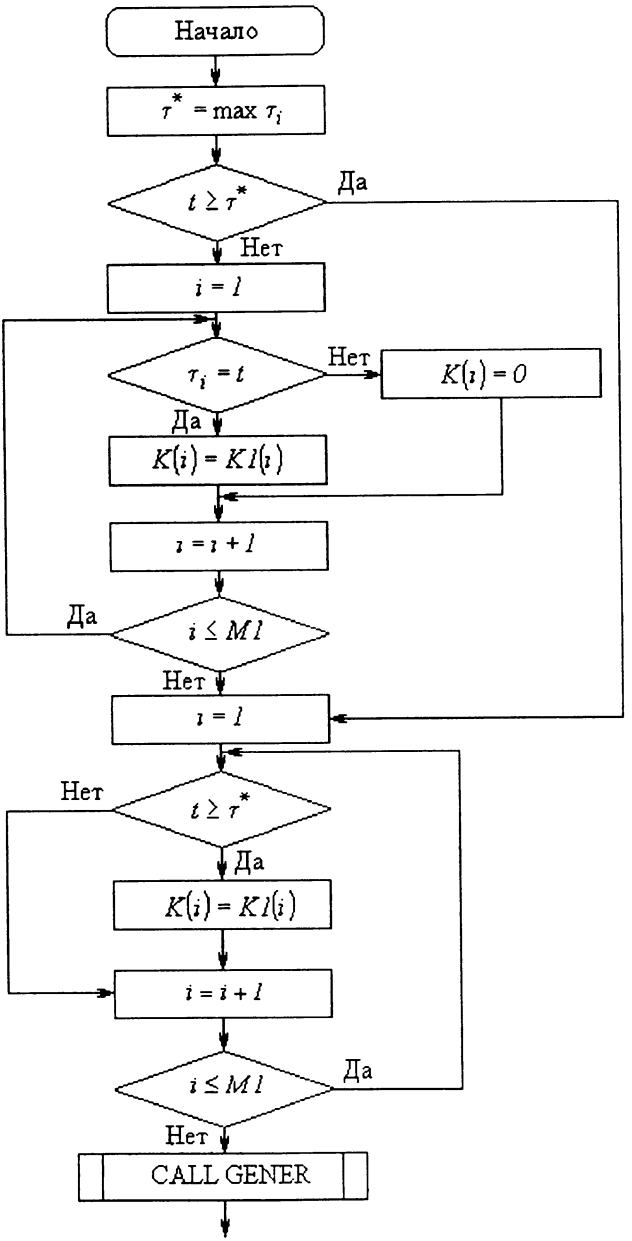


Рис 6 11 Временная диаграмма формирования значений весовых коэффициентов

вания процесса загрязнения, t^* – время первого изменения режима процесса загрязнения, h_t^* – шаг изменения режима процесса загрязнения, T –максимальное время генерации процесса загрязнения, $R_{l,j,l}$, $i = 1,M$, $j = 1,M$, $l = 1,N$ – взаимоковариационная матрица стохастических составляющих загрязняющих веществ, $R0_{i,j}$, $i = 1,M$, $j = 1,KN$ – дисперсионная матрица стохастических составляющих концентрации загрязняющих веществ, IND_i, $i = 1,KN$ – элементы массива, принимающие значения 0 или 1 Результатом работы данного блока является массив $K1_i$, $i = 1,M1$ текущие значения весовых коэффициентов для концентрации загрязняющих веществ, определяющих технологические режимы работы соответствующих источников загрязнения

Для более наглядного представления о работе рассматриваемого блока на рис 6 11 приведена временная диаграмма формирования значения весовых коэффициентов K_i для простого примера, когда источников загрязнения два, причем оба либо сбрасывают заданные количества загрязняющих веществ, либо не сбрасывают Сброс загрязняющих веществ начинается сразу при запуске производства Через определенное время t^* выходит из строя второй источник загрязнения (т е он прекращает сбрасывать загрязняющие вещества), а через время $t^* + h_t^*$ - первый источник загрязнения, одновременно второй начинает функционировать, т е сбрасывать загрязняющие вещества Интервалы τ_1 и τ_2 – время достижения водой контролируемой очки от первого (τ_1) и второго (τ_2) источника загрязнения

В случае, показанном на рис 6 12, математические модели пересчета концентрации загрязняющих веществ имеют вид


Начало
$\tau^* = \max \tau_i$
$t \geq \tau^*$
Да
Нет
$i = 1$
$\tau_i = t$
Нет
$K(1) = 0$
Да
$K(i) = K1(i)$
$i = i + 1$
Да
$i \leq M1$
Нет
$i = 1$
Нет
$t \geq \tau^*$
Да
$K(i) = K1(i)$
$i = i + 1$
$i \leq M1$
Да
Нет
CALL GENER

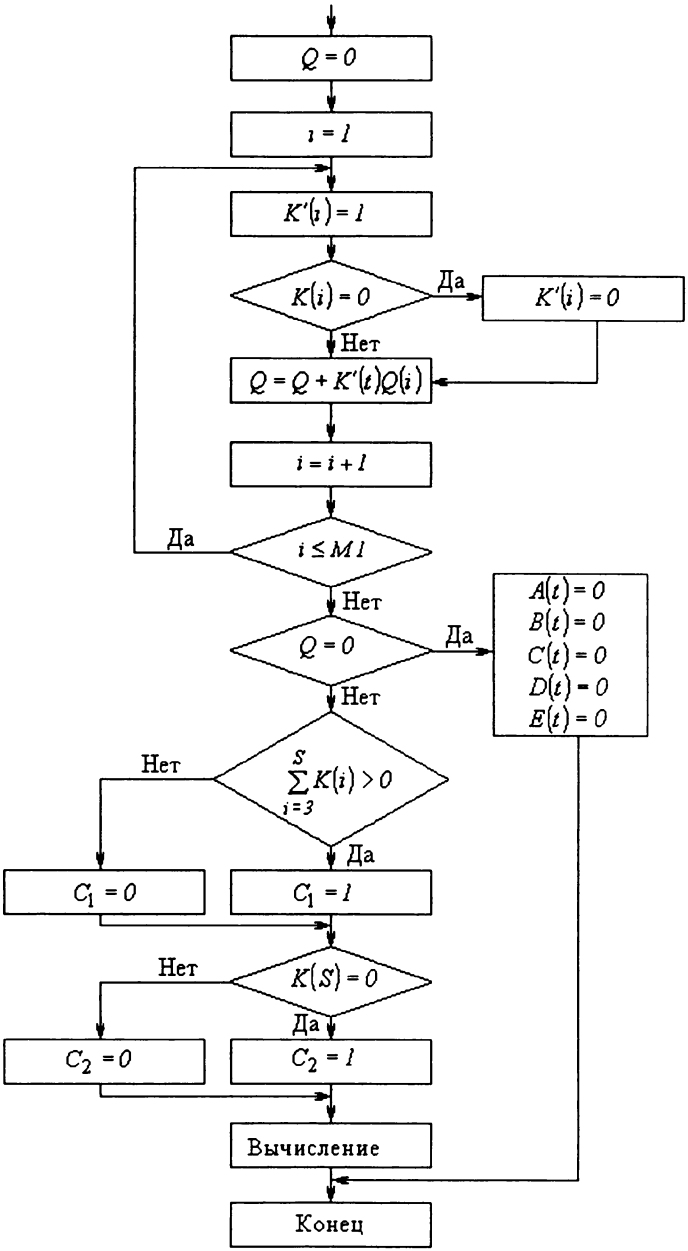


Рис 6 12 Блок-схема алгоритма моделирования концентрации загрязняющего веществ

$$
\begin{aligned}
Q(t) &= \sum_{i=1}^{5} K_i' Q(t), \\
A(t) &= \frac{1}{Q(t)} \sum_{i=1}^{5} K_i a_i (t-\tau_i) Q_i (t-\tau_1) + C_1 x_1 (t), \\
B(t) &= \frac{1}{Q(t)} \sum_{i=1}^{5} K_i b_{i-2} (t-\tau_i) Q_i (t-\tau_i) + C_2 x_2 (t), \\
C(t) &= \frac{1}{Q(t)} \left[K_5 C(t-\tau_5) Q_5 (t-\tau_5) \right] + C_3 x_3 (t), \\
D(t) &= \frac{1}{Q(t)} \left[K_5 d(t-\tau_5) Q_5 (t-\tau_5) \right] + C_3 x_4 (t); \\
E(t) &= \frac{1}{Q(t)} \left[K_5 l(t-\tau_5) Q_5 (t-\tau_5) \right] + C_3 x_5 (t),
\end{aligned}
\qquad (6\,4)
$$

где

$$
C_1 = \begin{cases} 1 \text{ при } K_1 \neq 0 \vee K_2 \neq 0 \vee K_3 \neq 0 \vee K_4 \neq 0 \vee K_5 \neq 0, \\ 0 - \text{ в противном случае;} \end{cases}
$$

$$
C_2 = \begin{cases} 1 \text{ при } K_3 \neq 0 \vee K_4 \neq 0 \vee K_5 \neq 0, \\ 0 - \text{ в противном случае,} \end{cases}
$$

$$
C_3 = \begin{cases} 1 \text{ при } K_5 \neq 0, \\ 0 - \text{ в противном случае.} \end{cases}
$$

Результатом работы блока, приведенного на рис 6 13, за один такт являются элементы M-мерного случайного вектора X_p, $p = 1,M$ Для их определения вычисляются коэффициенты b_l^p, $l = 1, p = 1, a_{i,j}^p$, $i = 1, M$, $j = 1,N$; σ_p, $p = 1,M$ с помощью авто- и взаимокова риационных функций Поскольку стохастическая составляющая концентрации загрязняющих веществ квазистационарна, значения авто- и взаимоковариационных функций пересчитываются периодически в автоматизированной системе контроля состояния воды. Соответственно пересчитываются неизвестные коэффициенты, а в течение периода стационарности процесса будут использованы их ранее рассчитанные значения С этой целью используются элементы массива IND, которые принимают два значения (0 или 1) в зависимости от необходимости пересчета неизвестных коэффициентов В моделировании используются нормально распределенные случайные числа, которые вычисляются простым преобразованием стандартных, равномерно распределенных случайных чисел, вырабатываемых генератором псевдослучайных чисел

Разработанные К Качиашвили имитационные модели использовались для генерации измеренных значений контролируемых параметров сточных вод завода.

Глава 7

Охлаждение оборотной воды

7.1. Системы охлаждения оборотной воды

На промышленных предприятиях применяют централизованную, локальную и промежуточную (групповую) системы охлаждения оборотной воды

К централизованным относятся системы охлаждения, обслуживающие потребителей, рассредоточенных по всей территории или в отдельных ее частях На одной территории может находиться несколько производств (или заводов), каждое из которых имеет свою централизованную систему Воду собирают от всех потребителей в единый коллектор нагретой воды и направляют в один охладитель или в группу охладителей, расположенных в одном месте, охлажденную воду также собирают в единый коллектор, по которому ее направляют к потребителям

В локальных системах каждый потребитель воды снабжен индивидуальным охладителем, который обслуживает только этого потребителя

В промежуточных (групповых) системах нагретую воду от каждой группы потребителей (например, находящихся в одном цехе, корпусе или в близко расположенных корпусах, т е объединенных по территориальному признаку) собирают в единый коллектор и направляют в охладитель, обслуживающий данную группу.

Такое разделение является в какой-то степени условным, поэтому дадим некоторые пояснения Если на предприятии имеется всего лишь один, пусть и крупный, потребитель воды (например, компрессорная станция), то такая система будет локальной, хотя других систем на предприятии нет Если же все потребители, имеющиеся на предприятии, сосредоточены в одном корпусе и подключены к одному охладителю, то эту систему следует отнести к групповой

Охарактеризуем более подробно каждую из систем

Централизованные системы имеют минимальное число устройств для охлаждения воды и минимальное число насосов К недостаткам централизованных систем можно отнести, во-первых, сложную, разветвленную и дорогостоящую сеть водоотводов нагретой и охлажденной воды, для перекачки которой затрачивается значительная энергия и используются высокопроизводительные насосы с электродвигателями высокого напряжения (до 6 кВ) и большой мощности, эта сеть весьма сложна в обслуживании и ремонте Для обслуживания централизованных систем (насосных станций, охладителей и т д) обычно содержится специальный штат

Во-вторых, для остановки охладителя, например, при проведении планового ремонта, требуется отключать всех потребителей или переводить их на водопроводную (техническую, а часто и хозпитьевую) воду Кроме того, при отключении отдельных потребителей в системе продолжает циркулировать неизменное количество воды, равно как и при подключении новых потребителей В результате этих мероприятий в системе возрастает температура нагретой и охлажденной воды, т е производительность централизованных сис-

тем практически не регулируется Поэтому при капитальном строительстве предусматриваются дополнительные эксплуатационные затраты, связанные с учетом возможного роста водопотребления и циркуляции избыточной воды

В-третьих, при любом местном загрязнении воды (например, нефтепродуктами) требуется полная ее замена в системе, что в случае крупных систем практически неосуществимо и всегда наносит ущерб всем чувствительным к данному загрязнению потребителям

В-четвертых, ко всем потребителям, независимо от их индивидуальных особенностей, охлажденная вода поступает фактически с одинаковой температурой

Централизованные системы целесообразно использовать на сравнительно небольших предприятиях с близко расположенными потребителями, чьи требования к воде различаются незначительно

Локальные системы обладают рядом достоинств, среди которых можно выделить следующие:

– незначительная по протяженности, простая и дешевая система водоотводов, при этом локальная система может быть частью технологической схемы потребителя и эксплуатироваться тем же штатом сотрудников,

– возможность осуществления индивидуальных требований потребителей к воде (чистота, содержание солей, температура, развиваемый перепад давления), в случае загрязнения вода в системе легко и быстро заменяется,

– в соответствии с режимом и графиком работы потребителя система может отключаться при остановке потребителя, расход циркулирующей в системе воды легко и быстро регулируется (последнее в централизованных системах трудноосуществимо) Одновременно со строительством новых объектов рядом с ними устанавливаются охладители воды,

– для потребителей малой мощности при ограниченных производственных площадях (обычно при реконструкции действующих предприятий и предприятий, расположенных в пределах жилой застройки) охладители локальных систем можно разместить на покрытиях зданий, эстакадах, антресольных площадках как снаружи, так и внутри здания

Использование локальных систем оправданно и эффективно во всех случаях

Групповые системы, занимающие промежуточное положение среди централизованных и локальных, целесообразны на крупных предприятиях

Несмотря на преимущества локальных систем, до сих пор применяют главным образом централизованные, реже – групповые системы

Для обеспечения нормального функционирования замкнутых систем водного хозяйства предприятий большое значение имеет правильно произведенный гидравлический расчет всех сооружений для охлаждения воды Расчет системы охлаждения предусматривает составление схемы водоводов, расчет их диаметров, расчет потерь напора и выбор насоса, расчет линии подпитки

Составление схемы водоводов. В схеме указывают все изгибы и длины труб, запорную и регулирующую арматуру и т д Пример такой схемы показан на рис 7 1 применительно к локальной системе с единичным потребителем и одним охладителем

Диаметр трубопровода рассчитывают, исходя из расхода воды $V_в$ и скорости ее перемещения $v_в$

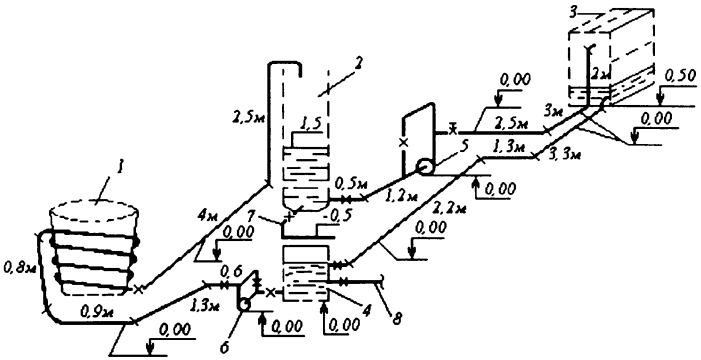


Рис 7 1 Примерная схема водоводов:
1 – потребитель (например, тепловыделяющий реактор), *2* – бак нагретой воды, *3* – охладитель, *4* - бак охлажденной воды, *5* – насос для нагретой воды, *6* – насос для охлажденной воды, *7* – линия дренажного сброса, *8* – линия подпитки

$$d_T = \sqrt{4V_в / \pi v_в}$$

Расход воды $V_в$ в системе с одним потребителем либо выбирают из паспортных данных потребителя, либо рассчитывают по заданному теплосъему Q и известному охлаждающему эффекту Δt выбранного охладителя (для эжекционных охладителей Δt может быть задано, тогда эта величина служит основой для расчета охладителя)

$$V_в = Q/(c_в \rho_в \Delta t),$$

где $c_в$ – теплоемкость воды, $\rho_в$ – плотность воды

При нескольких потребителях для магистральных водоводов берут общий суммарный расход воды, а для ответвлений к потребителям — соответствующие расходы по каждому из них

Скорость воды в трубах $v_в$ при незначительной их протяженности от насоса до конечной точки (порядка 5-10 м) можно принять равной не более 3 м/с При большей длине водоводов ее рекомендуется принимать равной 1 м/с Скорость движения воды в сливных трубах дренажного сброса $v_{дс}$ можно рассчитать по формуле

$$v_{дс} = \varphi\sqrt{2gH},$$

где H – перепад высот между уровнем воды в емкости, из которой она сбрасывается в дренаж, и нижней точкой сливной трубы (на приведенной схеме H = 1,5 ÷ 0,5-2 м).
φ – коэффициент скорости, обычно составляющий 0,95-0,97

Потери напора (см рис 7.1) рассчитывают для каждой ветви

На схеме их три первая начинается от бака нагретой воды *2*, заканчивается на входе в охладитель *3* и включает в себя насос *5*, вторая начинается на некотором расстоянии от емкости охлажденной воды *4* и заканчивается при входе в емкость *2* Эта ветвь включает в себя потребитель *1* и насос *6*, третья ветвь служит для слива воды (самотеком) из охладителя *3* в емкость *4*

Общие потери напора складываются из потерь на трение на прямых участках и потерь на местных сопротивлениях (повороты, разветвления запорная арматура и т д) Потерю напора на единицу длины трубопровода ($\Delta l'_i$), называемую "гидравлическим уклоном", с учетом сопротивления стыковых соединений рассчитывают по формуле

Таблица 7 1 Значения констант в уравнениях (7 1), (7 2) для расчета гидравлического сопротивления трубопроводов

Трубы	m	A_0	$A_1 \cdot 10^3$	C	$k \cdot 10^3$	p	n
Новые стальные без внутреннего защитного покрытия или с битумным защитным покрытием	0,226	1	15,90	0,684	1,790	5,10	1,90
Новые чугунные без внутреннего защитного покрытия или с битумным защитным покрытием	0,284	1	14,40	2,360	1,790	5,10	1,90
Новые стальные и чугунные без внутреннего защитного покрытия или с битумным защитным покрытием	0,300	1	17,90	0,867	1,735	5,30	2,00
Асбоцементные	0,190	1	11,00	3,510	1,180	4,89	1,85
Железобетонные виброгидропрессованные	0,190	1	15,74	3,510	1,688	4,89	1,85
Железобетонные центрифугированные	0,190	1	13,85	3,510	1,486	4,89	1,85
Стальные и чугунные с внутренним пластмассовым или полимерцементным покрытием, нанесенным методом центрифугирования	0,190	1	11,00	3,510	1,180	4,89	1,85
Стальные и чугунные с внутренним цементно-песчаным покрытием, нанесенным методом набрызга с последующим заглаживанием	0,190	1	15,74	3,510	1,688	4,89	1,85
Стальные и чугунные с внутренним цементно-песчаным покрытием, нанесенным методом центрифугирования	0,190	1	13,85	3,510	1,486	4,89	1,85
Пластмассовые	0,226	0	13,44	1,000	1,052	4,774	1,774
Стеклянные	0,226	0	14,61	1,000	1,144	4,774	1,774

$$\Delta P_l = (\lambda / d_T)(v_в^2 / 2g) = (A_1 / 2g)[(A_0 + C / v_в)^m / d_T^{m-1}]v_в^2, \quad (7\ 1)$$

где $\lambda = A_1 (A_0 + C / v_в)^m / d_T^{m+1}$ (значения констант A_1, A_0, C для наиболее распространенных видов труб приведены в табл. 7 1)

При гидравлических расчетах систем подачи и распределения воды на ЭВМ потери напора ΔP_l рекомендуется определять по выражению

$$\Delta P_l = k V_в^n / d_T^p, \quad (7\ 2)$$

где $V_в$ – расчетный расход воды, л/с, d_T – расчетный диаметр труб, м, k, n, p – константы (см табл 7 1)

Если в трубопроводах нет защитного покрытия, то значения A, c и k следует умножить на коэффициент $1 \le z \le 2$

Потери напора на местных сопротивлениях (ΔH) определяют по формуле Вейсбаха

$$\Delta H = \xi v_в^2 / (2g)$$

Здесь ξ – коэффициент местного сопротивления, его значения берутся из справочников Наиболее часто встречаемые значения ξ приведены ниже

	ξ		ξ
Вход из насоса в трубу	0,50	Поворот трубы	0,15
Запорный вентиль	0,44	Вход в емкости под углом 90°	1,50
Разветвление трубопровода	1,00	Выход из емкости в трубу	1,00

Насос выбирают по каталогам характеристик насосов, исходя из заданного расхода воды и требуемого напора Последний определяют как сумму трех величин 1) потери напора в водоводах, 2) разность уровней между местом забора воды и ее подачей, 3) перепад гидростатического напора, который должен обеспечиваться на конечном элементе схемы (например, на форсунках)

Электродвигатель подбирают к насосу, исходя из рассчитываемой мощности двигателя ($N_{дв}$)

$$N_{дв} = kN,$$

где N – мощность, потребляемая насосом, k – коэффициент запаса мощности

$N_{др}$, кВт	До 20	21-50	51-до 300	300
k	1,25-1,30	1,2	1,15	1,1

Для воды $N = 9{,}81 \cdot V_в H / \eta$, где η – КПД насосной установки, он определяется как произведение КПД насоса, электродвигателя, узла передачи мощности от двигателя к насосу, т.е. $\eta = \eta_н \eta_э \eta_у$. При отсутствии паспортных данных КПД насоса можно принять равным единице По мощности, потребляемой насосом, с учетом коэффициента запаса k можно подобрать двигатель с мощностью не ниже расчетной

Напомним, что центробежные насосы используются главным образом в системах оборотного водоснабжения Принять следующие обозначения насосов К и КМ – консольные (КМ объединен с двигателем в моноблок), Д – с

Таблица 7.2 Параметры насосных установок

Марка насоса	Подача, $м^3/ч$	Напор, м	Частота вращения, $мин^{-1}$	Электродвигатель	Габаритные размеры, мм	Масса агрегата, кг
				мощность, кВт		
К45-55	45	55	2900	А2-62-2 / 17	1360×515×525	210
К90-35	90	35	2900	А2-61-2 / 17	1325×515×525	305
Д200-95	100	23	1450	А2-61-4 / 13	1464×680×640	468
Д200-95	200	95	2950	А2-01-2 / 75	1905×720×815	1035
Д320-70	320	70	2950	А02-92-2 / 100	1845×725×842	1207
Д630-90	500	36	980	А03-315-6 / 110	2403×1256×1070	1987
Д630-90	630	90	1450	А03-3559-4 / 250	2575×1328×1295	2699

двухсторонним подводом воды к рабочему колесу, ПН и ПНС – многоступенчатые (ПНС – многоступенчатые секционные), В – вертикальные Цифры, стоящие после буквенного обозначения – это подача ($м^3/ч$) и развиваемый напор (м) Параметры некоторых насосных установок приведены в таблице 7 2

Расчет расхода добавочной (подпиточной) воды. Расход подпиточной воды равен убыли воды из системы, которая складывается из следующих составляющих

а) безвозвратное потребление (например, отбор воды из системы на технологические нужды);

б) потери воды на испарение при охлаждении $V_{исп}$, ($м^3/ч$), которые можно определить по формуле:

$$V_{исп} = k_{исп} \Delta t V_в,$$

где Δt – перепад температуры воды в охладителе, °С, $V_В$ – расход оборотной воды, $м^3/ч$, $k_{исп}$ – коэффициент, учитывающий долю теплоотдачи за счет испарения в общей теплоотдаче, для брызгальных бассейнов и градирен он зависит от температуры воздуха

Температура воздуха, °С	0	10	20	30	40
$k_{исп}$	0,001	0,0012	0,0014	0,0015	0,0016

Для водохранилищ (прудов) этот коэффициент зависит от естественной температуры в водотоке

Температура воды в реке или канале, впадающих в водохранилище, °С	0	10	20	30	40
$k_{исп}$	0,0007	0,0009	0,0011	0,0013	0,0015

в) потери воды от механического уноса приводятся в процентах от расхода оборотной воды (вентиляционные градирни с водоуловителями 0,1-0,2%, башенные градирни без водоуловителей 0,5-1%, башенные градирни с водоуловителями 0,01-0,05%, открытые и брызгальные градирни 1-1,5%, брызгальные бассейны 2-3%),

г) сброс воды из системы (продувка), определяемый в зависимости от качества оборотной и добавочной воды, а также от способа ее обработки Продувка предназначена, прежде всего, для предотвращения роста концентрации растворенных в воде солей

Если отбор воды на технологические нужды достаточно велик (более 5% расхода воды в системе), то продувку можно не предусматривать Если вода после потребителя нуждается в очистке, то в балансе следует учитывать ее потери на очистных сооружениях Для водохранилищ (прудов) следует учитывать фильтрацию части воды через водопроницаемые основания и ограждающие дамбы

При использовании известных мер, предотвращающих отложение растворенных в воде солей, расход воды на продувку можно принять равным 2-3% (в отсутствие безвозвратных потерь на технологические нужды)

Аэродинамический расчет системы охлаждения выполняют, прежде всего для определения *аэродинамического сопротивления охладителя* Δp

$$\Delta p = \sum \xi_м v^2 \rho / 2g,$$

где $\xi_м$ – коэффициент местных сопротивлений, v – скорость воздуха, ρ – плотность воздуха, g – ускорение свободного падения

Сопротивление охладителя зависит от различных факторов типа охладителя, его размеров и формы, конструкции оросителя, направления движения воздуха и т п Поэтому в практических расчетах пользуются справочными или экспериментальными данными Так, коэффициент сопротивления вентиляторных градирен, отнесенный к средней скорости воздуха в полном сечении оросителя, составляет 60-100

Тепловой расчет охладителей и технико-экономическое обоснование их выбора. Используются данные по среднемесячным метеорологическим условиям, а также применительно к условиям наиболее жаркого периода Такими данными являются температура и влажность воздуха, барометрическое давление и скорость ветра. Для расчета водохранилищ-охладителей скорость ветра принимают на высоте 2 м над зеркалом воды Для приведения ее к уровню $h = 2$ м вводят поправочный коэффициент

Расчетный жаркий период выбирают с учетом особенностей охладителей их теплоаккумулирующей способности, зависящей от объема содержащейся в них воды Для градирен и брызгальных бассейнов, в которых объем воды невелик, а время водообмена не превышает нескольких часов, в качестве расчетных условий жаркого периода принимают среднесуточные метеорологические условия жаркого дня (5-10% летнего периода года, определяемые по многолетним наблюдениям)

Для водохранилищ-охладителей с большими объемами воды и высокой теплоаккумулирующей способностью, с водообменом, исчисляемым несколькими сутками, в качестве расчетных метеорологических факторов при-

нимают среднесуточные метеорологические условия, наблюдаемые в декаду, наиболее неблагоприятную для охлаждения воды Метеорологические условия жаркой декады выбирают, исходя из многолетних наблюдений на ближайшей к водохранилищу-охладителю метеорологической станции, по признаку неблагоприятного сочетания высоких температур воздуха, большой его влажности и малой скорости ветра, что способствует максимальному значению естественной температуры воды

Сооружения и аппараты для охлаждения воды. В практике охлаждения оборотной воды применяют испарительное охлаждение и охлаждение в поверхностных теплообменниках (через стенку, разделяющую фазы) Хладагентом является, как правило, атмосферный воздух Иногда в поверхностных теплообменниках в качестве хладагента используют фреоны, аммиак и др

При испарительном охлаждении вода в аппарате течет в виде пленки или капель, при этом испаряется 1-2% воды Таким образом, до 85% тепла передается от воды воздуху за счет массообмена, а остальное – путем конвективного теплообмена с воздухом Оба процесса протекают одновременно и влияют один на другой В процессе испарения температура воды приближается к температуре воздуха, теплообмен при этом замедляется В пределе температура воды может приблизиться к температуре мокрого термометра, т е быть ниже температуры воздуха Одновременно изменяются температура и парциальное давление воздуха, а значит, и движущая сила процесса массообмена

В поверхностных аппаратах вода охлаждается только в результате теплообмена Даже при противоточном (встречном) движении фаз ее предельной (теоретически достижимой) температурой является температура хладагента на входе в аппарат, что весьма существенно, особенно в теплое время года, наряду с другими причинами это ограничивает использование таких охладителей

Испарительными охладителями могут быть водохранилища (или пруды)-охладители, брызгальные бассейны, градирни (открытые, башенные и вентиляторные), эжекционные охладители Из поверхностных применяют воздушные (радиаторные) теплообменники, получившие название сухих градирен Эта классификация представлена на рис 7 2

Кратко охарактеризуем каждый тип охладителей и целесообразность их применения в различных замкнутых системах водного хозяйства

Водохранилища-охладители Поверхностью тепломассообмена в них является поверхность зеркала воды При прочих равных условиях эффективность охлаждения воды зависит от гидравлической нагрузки на 1 $м^2$ площади контакта Обычно этот показатель составляет порядка 0,04 $м^3$ Для подачи воды в водохранилища не требуется высокий напор, вода может поступать в них самотеком, что обусловливает низкие энергетические затраты Однако эти охладители занимают большие площади, кроме того, для предотвращения их заиливания и зарастания требуются значительные инвестиции и существенные эксплуатационные издержки Водохранилища-охладители целесообразны в централизованных системах водооборота на крупных предприятиях, особенно если для них можно использовать выработанные карьеры, торфяники и т п

Брызгальные бассейны Охлаждаемая вода диспергируется на капли, по-

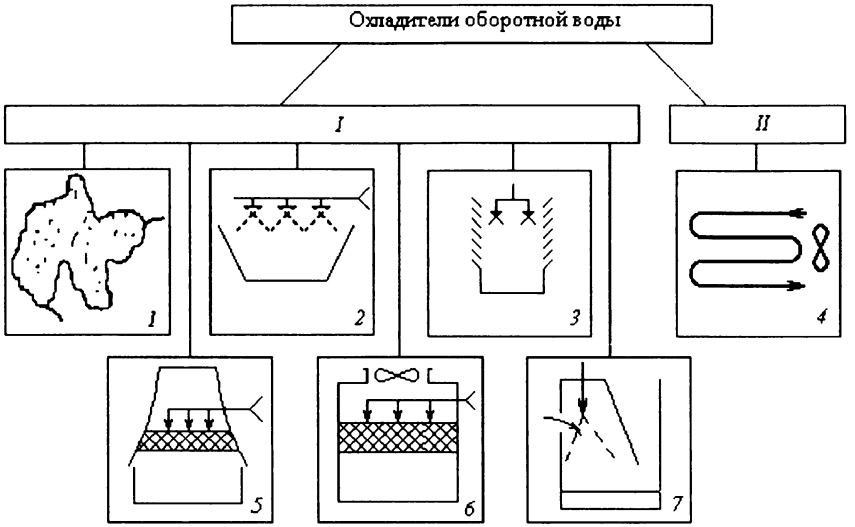


Рис 7 2 Классификация охладительной оборотной воды

I – испарительные, *II* – поверхностные, *1* – водохранилища, *2* – брызгальные бассейны *3* – открытые градирни *4* – радиаторные градирни *5* – башенные градирни, *6* – вентиляторные градирни, *7* – эжекционные охладители

верхность которых будет поверхностью тепломассообмена Гидравлическая нагрузка на 1 м^2 брызгального бассейна составляет 0,8-1,0 м^3 Охлаждающая способность этих охладителей низка и нестабильна, она зависит от направления и скорости ветра, поэтому их следует сооружать на открытых и хорошо продуваемых площадках Кроме того, для брызгальных бассейнов характерен высокий механический унос жидкости и интенсивное туманообразование Во избежание обмерзания окружающих сооружений такие охладители нужно сооружать на значительном расстоянии от дорог и построек, что обусловливает увеличение длины, а значит, и стоимости водоводов

Открытые градирни По эффективности работы и способу подвода воздуха эти охладители мало отличаются от брызгальных бассейнов В простейшем случае – это тот же бассейн с распылителями, образующими направленный вниз поток капель, он снабжен жалюзийным ограждением Более эффективны открытые градирни, заполненные насадкой (оросителем) в виде ряда горизонтально расположенных щитов из реек или досок

Башенные градирни Эти градирни могут быть пленочными или капельными Для обеспечения давления воздуха их снабжают высокой вытяжной башней Гидравлическая нагрузка составляет 4-5 м^3/(м^2·ч) на капельных градирнях и 6-7 м^3/(м^2·ч) на пленочных. С уменьшением их габаритных размеров тяга башни (удельный расход воздуха) существенно снижается, уменьшается и охлаждающий эффект, поэтому градирни проектируют на большие расходы воды Наиболее целесообразно использовать их в централизованных (реже – групповых) системах водооборота с расходом воды 3000 м^3/ч и более

Вентиляторные градирни отличаются от башенных тем, что воздух в них подается вентилятором, и это позволяет повысить удельный расход воздуха Гидравлическая нагрузка достигает 8-10 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ Их также отличают меньшие, по сравнению с башенными, затраты, но повышенные эксплуатационные издержки Малые вентиляторные градирни имеют малый охлаждающий эффект, поэтому их целесообразно применять в оборотных системах с расходом воды от 500 до 3000 $м^3/ч$

Радиаторные градирни. Для продувки воздуха в них используют вентиляторы или вытяжные башни Воздух проходит через радиаторы, внутри которых движется вода Для повышения интенсивности теплообмена радиатор изготовляют из металлов с высокой теплопроводностью (латунь, алюминий), они имеют ребристую наружную поверхность, так как коэффициент теплоотдачи от гладкой стенки воздуху весьма невелик Большие затраты цветного металла обусловливают и высокую стоимость охладителей

Преимущество радиаторных градирен – отсутствие потерь воды, а также более низкие, чем в испарительных градирнях, температуры охлажденной воды в холодный период года. Однако если учесть их громоздкость, высокие энергетические затраты, существенное снижение эффективности вследствие загрязнения внешней поверхности теплообмена, то их целесообразно использовать на предприятиях, размещенных в маловодных районах с высокой стоимостью воды, необходимой для подпитки систем с охладителями испарительного типа

Эжекционные охладители не нуждаются ни в вытяжной башне, ни в вентиляторе Воздух поступает в них за счет эффекта эжекции, создаваемого потоком капель воды, распыленной с помощью специальных форсунок В них отсутствует насадка (ороситель), они просты и удобны в эксплуатации

Таблица 7 3 Минимальные расстояния между охладителями воды и соседними объектами

Сооружения	Расстояние, м		
	от брызгального бассейна	до башенных и одновентиляторных градирен	до секционных вентиляторных градирен
Здания со стенами из плотных материалов, выдерживающих до 15 циклов замораживания	60	20	30
Открытые электрические подстанции	80-100	30-40	40-60
Открытые топливные склады	60-80	20-30	30-50
Брызгальные бассейны и открытые градирни	–	40-60	40-60
Градирни башенные секционные вентиляторные	40-60	15-30	15-30
Забор, ограждающий площадку	15-20	10-15	15-20
Внешние железнодорожные пути	80	40	60-80
Внутренние железнодорожные пути	30	20	20-40
Автодороги общего пользования	60-80	20-30	40-60
Автодороги внутризаводские и подъездные	30	10	20

Примечания 1 Нижние пределы указанных расстояний относятся к охладителям малых размеров градирням производительностью до 300 м^3/ч и брызгальным бассейнам производительностью до 2000 м^3/ч 2 Для северных районов при средней температуре воздуха в наиболее холодную пятидневку ниже –35 °С минимальные расстояния от охладителя до сооружений и дорог должны быть увеличены на 25%, а для районов с температурой выше –20 °С уменьшены на 25%

Места размещения охладителей. Размещение поверхностных охладителей относительно соседних сооружений не имеет каких-либо ограничений Охладители же испарительного типа в связи с туманообразованием и брызгоуносом должны отстоять от соседних сооружений на определенном расстоянии Вентиляторные и эжекционные охладители можно монтировать на крышах зданий, в которых размещены водопотребители, при условии, что такие здания достаточно удалены от других, имеющих большую высоту

Туман от градирен распространяется в штилевую погоду вертикально на высоту до 50 м, а при отрицательных температурах – до 100 м и выше В зависимости от скорости ветра и температуры воздуха длина шлейфа тумана может достигать 500 м

Расстояние между охладителями и расположенными вблизи зданиями и дорогами регламентируется данными, приведенными в табл 7 3

7.2. Интенсификация процессов охлаждения

Создание замкнутых систем водного хозяйства предприятий предполагает значительные инвестиции Издержки на их эксплуатацию также велики Все это заставляет изыскивать пути снижения затрат, и в первую очередь здесь следует назвать сооружения для охлаждения воды, поскольку на их строительство и эксплуатацию приходится значительная часть общих затрат

В последние годы все большее внимание привлекают специальные устройства для интенсификации процессов охлаждения в действующих системах технического водоснабжения

Как известно, распыл любых форсунок является полидисперсным Масса крупных капель, при относительно небольшом их числе, может достигать 60-70% от общей массы капель Крупные капли вследствие малой удельной поверхности требуют для завершения процесса (охлаждения до заданной температуры) большого времени контакта с газом Вместе с тем их удельная лобовая поверхность меньше, они слабее тормозятся воздухом, так что время их контакта с ним невелико Устранить или существенно снизить проявление этого противоречия можно принудительным вторичным дроблением капель на пути их движения помещают дробящие элементы При ударе крупных капель о препятствие они будут не только дробиться, но и затормаживаться Существенному повышению эффективности испарительного охлаждения способствует и так называемый эффект Шабалина, заключающийся в многократном увеличении коэффициентов тепло- и массопередачи при ударе капель о препятствие и обусловленный интенсивным внутренним движением жидкости и обновлением поверхности в момент удара капли Образовавшиеся новые частицы имеют бóльшую удельную поверхность

Экспериментальные исследования на пилотной установке, представляющей собой однофорсуночный охладитель с расходом воды до 10 м^3/ч, а также

испытания промышленных аппаратов полностью подтвердили правильность приведенных рассуждений При оптимальных параметрах дробящего устройства средний размер капель после столкновения с ним уменьшается на 15-25%, т е поверхность контакта возрастает на 20-60% и на 20-40% увеличивается охлаждающий эффект

Установлено, что при использовании сетчатого дробителя при выбранных диаметре сопла и перепаде давления на форсунке (соответствует определенному диаметру капель и скорости истечения) существуют вполне определенные значения размера ячеек сетки и диаметра проволоки, при которых обеспечивается наилучшее дробление. С увеличением ячеек сетка оказывает все меньшее влияние на степень охлаждения, а с их уменьшением начинает работать как генератор крупных капель

Разработанные аппараты по типу дробящего устройства (рис 7 3*а-в*) можно разделить на три группы с неподвижными сетками (рис 7 3*а, б*) и со свободно подвешенными нитями или лентами (рис 7 3*в*)

Простейшими являются аппараты с неподвижной сеткой для вторичного дробления (рис 7 3*а*) Внедрение таких охладителей (производительностью 35 и 90 м^3/ч) показало, что их эффективность, по сравнению с аппаратами без сеток, выше (перепад температур при установке сетки возрос на 10-15%) Вместе с тем положительный эффект, т е рост перепада температур в аппарате со сплошной сеткой, оказался несколько ниже ожидаемого Как показали замеры, сопротивление смоченной сетки вызывает некоторое снижение расхода газа через аппарат (коэффициента эжекции) Этого недостатка лишен аппарат, показанный на рис 7 3*б* В нем сетка выполнена не сплошной, а разделена на отдельные наклонные элементы, оставляющие свободный проход для газа и перекрывающие для капель все сечение (в свету) контактной зоны.

Еще меньшим гидравлическим сопротивлением должны обладать аппараты с нитевидными (ленточными) дробящими устройствами Пример градирни с таким дробителем показан на рис 7 3в В ней крупные капли при встрече с нитями не только дробятся, но часто образуют на них стекающую пленку, что также способствует развитию поверхности контакта и увеличению времени удерживания жидкой фазы в контактной зоне Очевидно, что выбор толщины нитей, их расстановка, как и для сеток, обусловлены конкретными условиями

Использование роторных сетчатых устройств для принудительного вторичного дробления капель также должно снижать гидравлическое сопротивление аппаратов В них под действием остаточной кинетической энергии капель ротор приводится во вращение и создает дополнительный вентиляционный эффект Предложено два варианта таких аппаратов (рис 7 4) с горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) осями вращения ротора Охладитель по первому варианту производительностью до 25 м^3/ч успешно испытан в производственных условиях

Перспективной для широкого внедрения в производство является конструкция, показанная на рис. 7.3*б* По сложности изготовления она практически не отличается от аппарата со сплошной сеткой, а по величине гидравлического сопротивления мало отличается от остальных конструкций

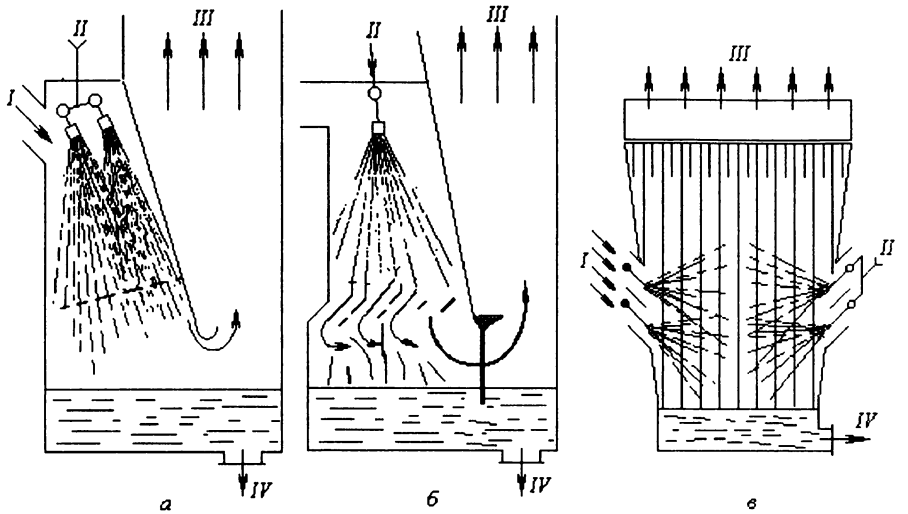


Рис 7 3. Аппараты с неподвижными устройствами вторичного дробления капель
а, б – с сетчатыми, *в* – с нитевидными, *I* – воздух, *II* – нагретая вода, *III* – отработанный воздух, *IV* – охлажденная вода

В настоящее время разработан типоразмерный ряд охладителей воды (ОВ) производительностью 5, 10, 20, 40, 80, 160 и 480 м^3/ч Первые шесть охладителей ряда выполнены аналогично показанному на рис 7 3*а* Более подробная схема приведена на рис 7 5.

Для удобства изготовления и монтажа аппарат выполнен из отдельных царг *б* Каждая царга представляет собой каркас из уголковой стали, который обшивается каким-либо материалом (листовой сталью, асбоцементными листами, стеклошифером, винилпластом и т д) Первая царга укреплена на сборном баке *7*, а каждая последующая частично вставлена в предыдущую и установлена на ней Так как особой герметичности между царгами не требуется, их соединяют сваркой в нескольких точках либо болтами

Охладитель ОВ-480 имеет в плане форму равностороннего шестиугольника (рис 7 6). Подводящий воду стояк *1* размещен в центре, он одновременно придает жесткость всей конструкции От стояка отходят радиальные водоводы *3*, к которым подключены коллекторы Для удобства обслуживания предусмотрена смотровая площадка, опоясывающая весь аппарат

При проектировании аппаратов принимается рабочее давление воды 0,3 МПа, что позволяет использовать широко распространенные насосы Задается также перепад температуры воды Δt до 15 °С (при начальной температуре жидкости $t_{ж\,н}$ = 40 °С и $t_{вз}$ = 17 °С) Сочетание приведенных модулей позволяет создавать гибкие и маневренные системы водооборота, что дает возможность учитывать загрузку потребителей, отключение отдельных потребителей и, в конечном итоге, значительно сокращать потребление электроэнергии и исключать простой оборудования при ремонте охладителей Кроме того, в ОВ-480 все шесть секций могут работать автономно либо в любом необходимом сочетании Примеры обвязки модулей приведены на рис 7 7*а-б*

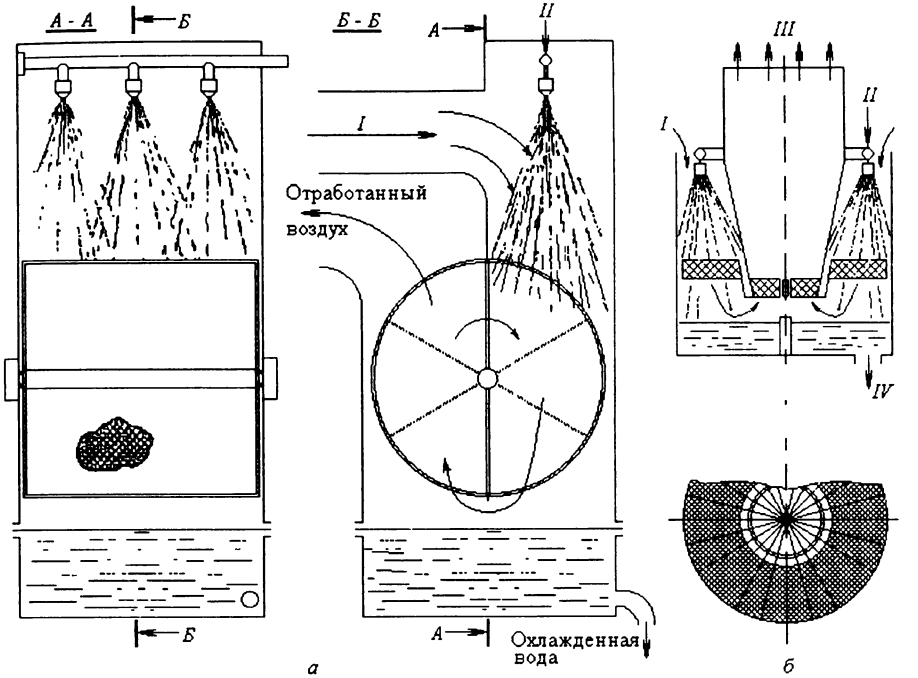


Рис 7 4 Аппараты с роторными устройствами вторичного дробления

а – с горизонтальным ротором, *б* – с вертикальным ротором (позиции те же, что на рис 7 3)

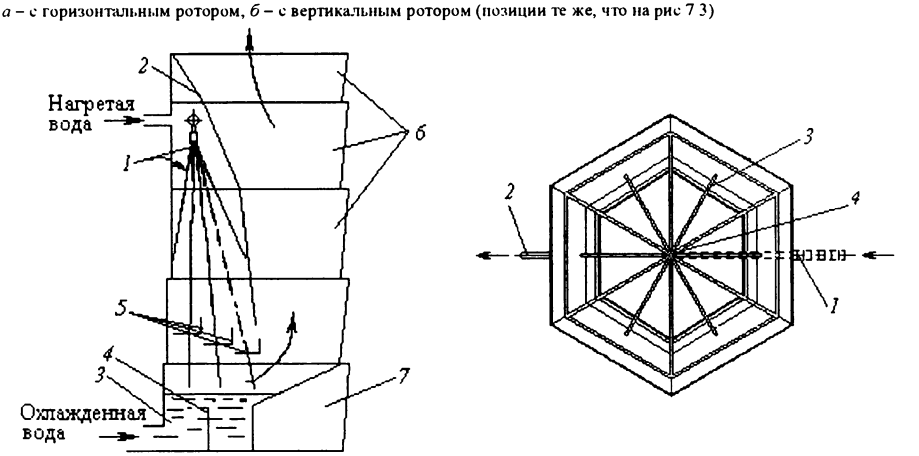


Рис 7 5 Охладитель производительностью до 160 м^3/ч

1 – форсунки, *2* – перегородки, отделяющие зону контакта от зоны сепарации, *3* – водосборная емкость, *4* – сетчатый элементный дробитель, *5* – отражатели, *6* – царги, *7* – сборный бак

Рис 7 6 Охладитель производительностью до 480м^3/ч

1 – подача горячей воды, *2* – слив охлажденной воды, *3* – радиальные водоводы *4* – центральный водоподающий стояк

Схема 7 7*а* отражает тот случай, когда баки охладителей одновременно являются и сборниками охлажденной воды.

Вода через потребителей *7* проходит без разрыва струи При отключении (включении) отдельных модулей перекрываются (открываются) задвижки (краны, вентили) *1* и *2* В работающие модули через вентили *6* подается и подпиточный расход воды При отключении отдельных потребителей перекрывают вентили *4* и *5* Если потребитель один, то вентили *4* и *5* не устанавливают В приведенной схеме работает только один насос НО, другой насос (НР) – резервный Для перекрытия потоков воды используют задвижки *3*

Если число потребителей равно числу охладителей, можно реализовать схему *б* В ней меньше запорной арматуры. Она допускает отключение одного из насосов при отключении потребителя (одновременно можно отремонтировать или заменить насос), т е позволяет снизить затраты электроэнергии, а также регулировать расход воды в весьма широких пределах В ряде случаев слив воды из потребителя, например теплообменников, компрессоров, должен быть открытым (с разрывом струи) Пример обвязки, учитывающей это требование, дан на рис 7 7*в* Здесь же показана возможность использования одного резервного насоса на обе ветви Основные технико-экономические показатели описанных охладителей приведены в табл 7 4

На рис 7 8 приведен пример промышленной реализации локальной системы водооборота компрессорной станции с охладителем типа ОВ внутри помещения и выходом отработанного воздуха выше перекрытия здания Для компенсации гидравлического сопротивления газоходов в четырех воздухозаборных каналах установлены осевые вентиляторы Производительность системы достигает 90 м^3/ч Размеры аппарата, разработанного с учетом выделенного места установки, составляют 4×5×5 м

Возможны следующие способы интенсификации действующих градирен увеличение производительности при том же охлаждающем эффекте, подача дополнительного количества воздуха в приосевую область градирни, оптимизация системы орошения насадки (оросителя) градирен, совершенствование насадки

Увеличение производительности градирен особенно необходимо в теплый период года Устройство, изображенное на рис 7 9, было испытано на башенной железобетонной градирне с площадью орошения 1520 м^2

Таблица 7 4 Показатели охладителей типа ОВ

Показатели	ОВ-5	ОВ-10	ОВ-20	ОВ-40	ОВ-80	ОВ-160	ОВ-480
Производительность, м^3/ч	5	10	20	40	80	160	480
Размеры, м							
длина	1,6	3	3,6	4,0	5,0	8,0	14
ширина	1,5	1,6	2,0	3,6	4,0	5,0	14
высота	2,5	3,5	4,5	4,5	6,0	7,0	9,0
Мощность насосов, кВт	3	4	6	12	24	48	144

Исследования на однофорсуночной модели позволили найти для напора, создаваемого циркуляционными насосами (80 кПа), оптимальные значения

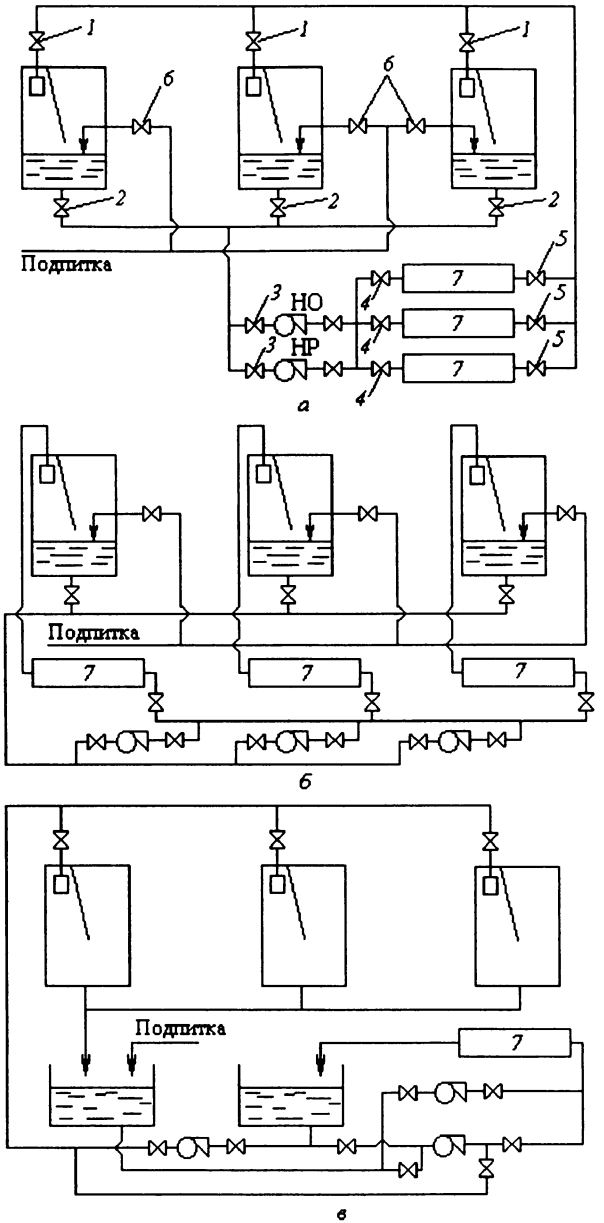
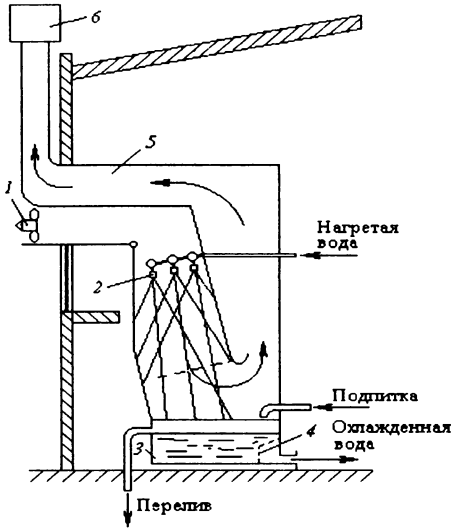


Рис 7 7. Обвязка элементов систем водооборотов·

а, *б* – без разрыва струи после потребителя; *в* – с разрывом струи после потребителя, *1-6* – задвижка (краны, вентили); *7* – потребителя воды; НО, НР – соответственно насосы основной и резервный



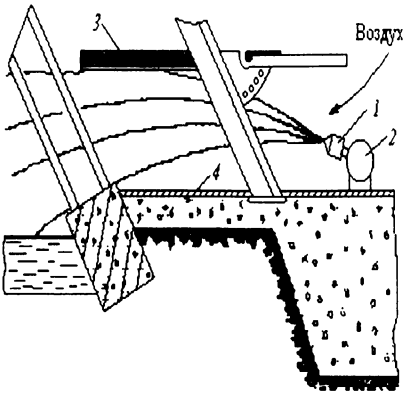


Рис 7 8 Промышленный охладитель типа ОВ (на 90 м^3/ч), установленный в помещении компрессорной станции

1 – вентиляторы, *2* – форсунки, *3* – бак для охлажденной воды, *4* – фильтр, *5* – газоход, *6* – дефлектор

Рис.7 9. Устройство для подачи в градирню дополнительных количеств воды и воздуха

1 – центробежно-струйные форсунки, *2* – коллектор, *3* – противообледенительные щиты, *4* – отмостка градирни

диаметра сопла (d_c = 12 мм) и корневого угла факела (β = 60°), при которых перепад температур воды в факеле равен перепаду, развиваемому градирней (10-11 °С)

Измерения локальных скоростей воздуха по сечению башенных градирен показали, что эти скорости значительно выше в периферийной зоне, чем в центре, т е к воде в приосевой зоне подводится недостаточно охлаждающего воздуха, и Δt в центре градирни ниже

Дополнительное количество воды распыляется центробежно-струйными форсунками *1*, которые установлены на кольцевом коллекторе *2*, расположенном вокруг чаши градирни Горизонтально размещенные противообледенительные щиты *3* и отмостка градирни *4* образуют плоскую кольцевую горловину

Оптимизация систем орошения заключается, прежде всего, в перераспределении орошающих форсунок в градирне с учетом реальной аэродинамической картины. Оптимальное размещение распылителей рассчитывают на основе результатов замеров поля удельных потоков воздуха по сечению башни на уровне оросителя Одновременно традиционные эвольвентные сопла целесообразно заменить цетробежно-струйными форсунками, так как коэффициент расхода последних примерно в два раза выше, соответственно в два раза сокращается и число форсунок Кроме того, заполненный факел центробежно-струйных форсунок значительно уменьшает локальные неоднородности орошения При этом можно использовать практически любые центро-

бежно-струйные форсунки Такую модернизацию градирен можно осуществить при капитальном ремонте или при переводе градирни с лоткового водораспределения на напорное.

Традиционный ороситель из деревянных брусьев имеет ряд существенных недостатков во-первых, довольно высокое гидравлическое сопротивление, что ограничивает расход воздуха, а следовательно, снижает охлаждающий эффект, во-вторых, развиваемая им поверхность контакта сравнительно невелика и, в-третьих, он довольно быстро разрушается

Поэтому предлагается использовать ячеистую насадку из полимерного материала, по которой вода растекается тонкой пленкой В зависимости от расположения насадки воздух движется по отношению к пленке противотоком либо перекрестным током Возможно также сочетание противотока с перекрестным противотоком

Основываясь на опыте промышленного внедрения этого оросителя, необходимо отметить, что хотя по сравнению с деревянным он значительно дороже, эти дополнительные затраты быстро окупаются, так как значительно увеличивается охлаждающий эффект или при том же охлаждающем эффекте увеличивается производительность градирен Одновременно возрастает ее межремонтный пробег, который становится соизмерим со сроком службы башни

Основными задачами при эксплуатации охлаждающих устройств являются обеспечение надежности их работы и поддержание охладительного эффекта на уровне проектных показателей Для этого необходимо ежедневно (не реже одного раза в смену) контролировать состояние элементов охладителей В дневное время суток контроль должен осуществлять специально назначенный для этого персонал, а в ночное ответственность по надзору возлагается на начальника смены цеха, в ведении которого находится охладитель

Детальный осмотр элементов с отключением отдельных зон орошения (кроме водохранилищ) должен осуществляться не реже двух раз в год перед началом летней и зимней эксплуатации Результаты ежедневного осмотра следует заносить в вахтенный журнал На основании детального осмотра составляют ведомость дефектов с указанием способов и сроков их устранения

Охладители необходимо периодически подвергать испытаниям В зависимости от поставленной цели различают три вида испытаний приемочные, балансовые и эксплуатационные

Приемочные испытания проводят после ввода охладителя в эксплуатацию для выявления соответствия фактического охладительного эффекта расчетному При отсутствии такого соответствия выявляют причины этого и в дальнейшем их устраняют

Балансовые испытания проводят в тех случаях, когда в эксплуатацию вводят головной образец охладителя, либо в случае модернизации охладителя устаревшего, когда в проекте модернизации заложены новые конструктивные решения отдельных элементов или охладителя в целом На основе результатов балансовых испытаний устанавливают целесообразность широкого применения тех или иных конструктивных решений в охладителях аналогичного типа

Эксплуатационные испытания проводят один раз в год При этом определяют расчетную температуру охлажденной воды на выходе из охладителя и сопоставляют ее с фактической Если фактическая температура меньше расчетной не более чем на 0,5 градуса, то работу охладителя можно считать удовлетворительной В противном случае выясняют причины снижения эффективности охлаждения и намечают мероприятия по их устранению

Для проведения эксплуатационных испытаний необходимы измерительные приборы, позволяющие определять расход воды, ее температуру до и после охладителя, температуру наружного воздуха по сухому и мокрому термометрам, расход и температуру добавочной воды, скорость ветра, барометрическое давление Показания приборов записывают с интервалом 30 мин на протяжении 6-7 ч дневного времени суток

Гидравлическая и тепловая нагрузки в течение опыта должны быть постоянными, отклонение первой не должно превышать 3%, а второй – 10% Замеры следует выполнять не менее чем при двух гидравлических и тепловых нагрузках Первую серию опытов проводят при гидравлической нагрузке, близкой к расчетной, а вторую – при нагрузке, составляющей 70-80% от расчетной Число опытов при каждом режиме должно быть не менее трех Полученные результаты замеров за каждый опыт (6-7 ч) усредняют и заносят в журнал в табличной форме При выпадении атмосферных осадков, а также при скорости ветра более 3 м/с контрольные испытания проводить не следует

Меры для предотвращения отложений и коррозии элементов эжекционных охладителей, а также касающиеся удаления ила и сора те же, что и для градирен.

Некоторые особенности эксплуатации эжекционных охладителей обусловлены тем, что их наиболее целесообразно использовать в локальных системах водооборота На рис 7 10 приведена схема локальной системы водооборота, построенная на базе эжекционного охладителя типа ОВ, для случая, когда после потребителя имеется разрыв струи

Бак-охладитель *1* снабжен водомерным стеклом, а бак-накопитель *2* может быть выполнен из стандартной трубы Трубопроводы монтируют с уклоном от охладителя $i = 0{,}035$ Манометры *3* и *4* имеют шкалу до 0,5 МПа, манометр *5* – до 0,05 МПа (вместо манометра *5* можно установить на баке *2* водомерное стекло) На трубопроводах рядом с манометрами *3* и *4* размещают термометры со шкалой 0-50 °С (0-100 °С)

Перед пуском системы после монтажа, ремонта или длительной остановки (более 10 сут) ее промывают Для этого необходимо закрыть все задвижки, снять форсунки *6*, открыть задвижку *7* на трубопроводе и заполнить через потребитель *8* бак *2*, открыть задвижку *9*, заполнить насос *10* водой, при закрытой задвижке *11* пустить насос и постепенно открывать задвижку *11*

После заполнения бака-охладителя *1* закрыть задвижку *7*, открыть задвижку *12*, заполнить насос *13* водой, при закрытой задвижке *14* пустить насос *13* и постепенно открыть задвижку *14*. Через 15 мин работы закрыть задвижку *14*, а затем *11* и остановить насосы *13* и *10*

После промывки следует открыть задвижку *7* так, чтобы обеспечивалась производительность подпитки порядка 4-7% от расхода воды в системе (компенсация 2% на испарение воды, 0,5% – на унос капель и до 4,5% – на дренажный сброс в канализацию во избежание засоления воды)

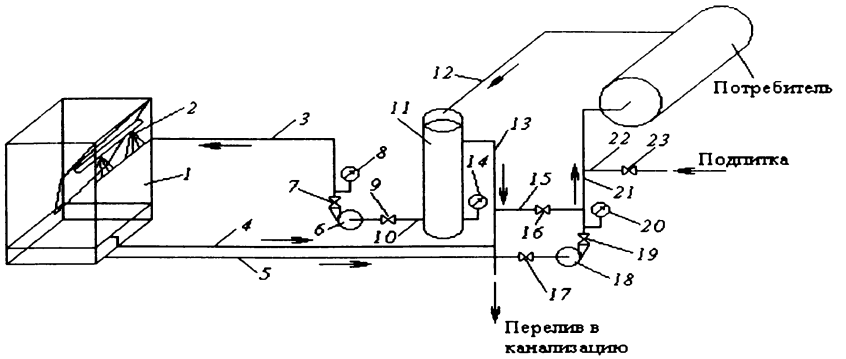


Рис 7 10 Схема локальной системы водооборота на базе эжекционного охладителя
1 – охладитель, *2*– форсунки, *3, 4, 5, 10, 12, 13, 15, 21, 22* – трубопроводы, *6, 18* – насосы, *7, 9, 16, 17, 19, 23* – задвижки, *8, 14, 20* – манометры, *11* – бак-накопитель

Производительность охладителя по воде контролируют манометром *3* (предварительно снимают расходные характеристики форсунок), а перепад температуры, обеспечиваемый охладителем, – термометрами, установленными на трубопроводах

Повышение давления на манометре *3* или повышение температуры на термометре, установленном около манометра *3*, свидетельствует о засорении форсунок *6* В этом случае необходимо остановить систему, снять и прочистить либо заменить форсунки, установить их и пустить систему

При остановке системы на длительный срок или для ремонта необходимо закрыть задвижку *7*, открыть задвижку *15* Когда бак-накопитель *2* опорожнится, нужно остановить насос *10*, а при опорожнении бака-охладителя остановить насос *13* и закрыть все задвижки Если система отключилась более чем на 1 ч, то при минусовой наружной температуре воздуха и размещении охладителя вне помещения необходимо закрыть задвижку *7* и остановить насос *10* При опорожнении бака-охладителя нужно остановить насос *13*, закрыть задвижки *11* и *14*

В процессе работы следует

1) контролировать не реже одного раза в смену работу форсунок визуально и по показаниям приборов (частое засорение форсунок указывает на необходимость замены воды в системе),

2) контролировать визуально не реже двух раз в месяц состояние сетчатого фильтра в баке *2*, при засорении извлечь его и очистить,

3) два раза в смену снимать показания манометров *3* и *4* и термометров,

4) один раз в смену измерять температуру и влажность атмосферного воздуха

7.3. Эжекционные охладители

Охладители эжекционного типа перспективны при создании замкнутых систем водообеспечения промышленных производств Все они относятся к семейству прямоточных распылительных аппаратов и содержат следующие основные элементы распылитель (или группу распылителей), дисперги-

рующий охлаждающую воду на капли, зону контакта охлаждающего воздуха с каплями воды, зону сепарации, где происходит отделение капель от воздуха (рис 7 11) Вода подается в форсунку под избыточным давлением (обычно 0,1-0,4 МПа) и образует на выходе из форсунки капельный факел

Поток быстро летящих капель оказывает воздействие на окружающий воздух и передает ему часть своего импульса, т е по мере движения жидкости постепенно уменьшается ее количество движения, и капли затормаживаются, а газ, напротив, приобретает количество движения Так как факел на начальном участке расширяется, в его полость эжектируется все большее количество газа Количественно удельный расход эжектированного газа характеризуется коэффициентом эжекции (объемным $u_0 = V_г/V_ж$ или массовым $u_м = (G_г/G_ж)$ Достигнув стенок аппарата в сечении касания, внешние капли конденсируются на них, образуя стекающую пленку, и в дальнейшем в передаче импульса газ не участвует

Часть факела от форсунки до сечения касания принято называть свободным факелом, а расположенную дальше – стесненным факелом В области стесненного факела расход газа остается неизменным, а изменение его скорости обусловливается только изменением сечения этой части аппарата Приобретаемый газом на этом участке импульс изменяет статическое давление, которое постепенно возрастает Таким образом, на участке свободного факела передаваемый жидкостью импульс расходуется на эжекцию газа, а на участке стесненного факела – на создание статического давления газа

Аппарат вместе с сепаратором (иногда присутствуют и газоходы) обладает вполне определенным гидравлическим сопротивлением, поэтому возможны ситуации, когда аппарат не сможет пропустить весь газ, эжектированный в полость свободного факела В этом случае избыток газа перед сечением касания выталкивается из факела, а выше сечения вновь эжектируется в него, т е выше сечения касания возникает область циркуляции газа, на что расходуется часть приобретенного газом от жидкости импульса движения

Итак, в зоне контакта формируются три характерных участка свободного факела, циркуляции и стесненного факела, имеющих свои особенности в отношении гидроаэродинамики и, следовательно, тепломассообмена

Следует также отметить, что указанные аппараты являются единственными охладителями, для которых разработано достаточно строгое аналитическое описание гидроаэродинамики и тепломассообмена, послужившее основой для создания методики их расчета и оптимизации Кроме того, адекватное аналитическое описание процесса испарительного охлаждения воды позволило всесторонне изучить интересующие явления,выявить основные закономерности, оптимальные соотношения и сформулировать следующие практические рекомендации

– диаметр однофорсуночных аппаратов следует выбирать близким к предельно возможному при данных условиях,

– при необходимом увеличении диаметра сопла форсунки следует также увеличивать диаметр аппарата и его длину,

– для уменьшения объема аппарата во всех возможных случаях следует вместо одной форсунки большой производительности устанавливать несколько форсунок с минимально возможным (в отношении надежности их работы) диаметром сопла,

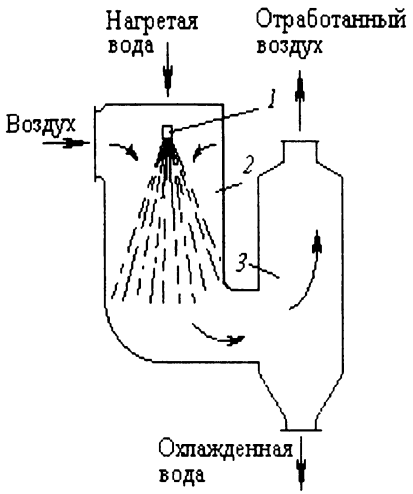


Рис 7 11 Принципиальная схема эжекционного охладителя
1 – форсунка *2* – зона контакта *3* – зона сепарации

– корневой угол факела β следует выбирать максимальным, но таким, чтобы длина свободного факела была наибольшей в данных условиях, в отсутствие стенок аппарата (например, в брызгальном бассейне) угол β следует брать максимальным для данных форсунок,

– перепад давления воды на форсунке следует выбирать в пределах 0,2-0,3 МПа, что соответствует максимальной эффективности процессов при минимальных энергетических затратах,

– в случае принудительной подачи в аппарат воздуха его скорость на уровне форсунок должна составлять от 0,5 $v_{вс.н}$ до 2 $v_{вс.н}$ ($v_{вс.н}$ – скорость воздуха при его принудительной подаче)

При расчете эжекционного охладителя определяют его оптимальные размеры, число распылителей, их расстановку и геометрические размеры для обеспечения требуемого перепада температуры $\Delta t_ж$ при заданных режимных параметрах (расходе охлаждаемой воды $V_ж$, ее начальной температуре $t_{ж.н}$, начальной температуре $t_{вс.н}$ и влажности воздуха φ)

Для расчета эжекционных охладителей можно воспользоваться упомянутой выше моделью Далее же приводится упрощенная методика, основанная на тех фактах, что начальная температура охлаждаемой воды на большинстве объектов редко выходит за пределы 30-50 °С, а температура охлаждающего воздуха – за пределы 13-22 °С

Порядок расчета эжекционных охладителей

1 Выбирают диаметр сопла форсунки, для этого можно воспользоваться приведенными ниже данными, которые учитывают тот факт, что с увеличением производительности аппарата возрастают его размеры, в том числе и высота контактной зоны

$V_ж$, м³/ч	До 15	15-25	25-50	50-75	75-100	100-200	200-300
d_c, мм	5	7	8	10	12	12-15	15-20

2 Принимают перепад давления жидкости в форсунке равным 0,2-0,3МПа, а угол β для центробежно-струйных форсунок – обычно 40-60 °С

3 Рассчитывают производительность одиночной форсунки (в м^3/с)

$$V_{\text{фl}} = \mu f_{\text{с}} \sqrt{2 p_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}}$$

Для воды

$$V_{\text{фl}} = 0{,}0447 \mu f_{\text{с}} \sqrt{p_{\text{ж}}},$$

где $p_{\text{ж}}$ – перепад давления воды в форсунке, Па; $f_{\text{с}} = \pi d_{\text{с}}^2/4$ – площадь соплового канала, м, μ – коэффициент расхода, расчетные уравнения для которого зависят от типа распылителя

Для центробежно-струйных форсунок

$$\mu = 0{,}96 p_{\text{ж}}^{-0{,}06} (0{,}676 - 24 d_{\text{с}})^{0{,}13}$$

4 Определяют необходимое число форсунок

$$n_{\text{ф}} = V_{\text{ж}}/V_{\text{фl}}$$

При малой производительности охладителя (до 5 м^3/ч) целесообразно устанавливать одну форсунку, зная расход и давление, по уравнению для одиночной форсунки рассчитывают диаметр $d_{\text{с}}$

5 Рассчитывают количество тепла Q, которое следует передать от охлаждающей воды воздуху

$$Q = V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} \Delta t_{\text{ж}}$$

6 Рассчитывают параметр M, учитывающий долю тепла, передаваемого массоотдачей (при испарении)

$$M = 0{,}804 \exp 0{,}056 t_{\text{г к}},$$

где $t_{\text{г к}}$ – температура воздуха на выходе из аппарата, принимается равной $0{,}9 t_{\text{ж к}}$, $\Delta t_{\text{ж}} = t_{\text{ж н}} - t_{\text{ж к}}$ ($t_{\text{ж к}}$ – конечная температура воды)

7 Находят количество тепла, передаваемого конвекцией ($Q_{\text{т}}$)

$$Q_{\text{т}} = Q/(1+M)$$

8 Рассчитывают необходимый расход воздуха

$$V_{\text{г}} = Q_{\text{т}}/(\rho_{\text{в.з}} c_{\text{в.з}} \Delta t_{\text{г}}),$$

где $\Delta t_{\text{г}} = t_{\text{г к}} - t_{\text{в н}}$

9 Определяют требуемый объемный коэффициент эжекции

$$u_{\text{о}} = V_{\text{г}}/V_{\text{ж}}$$

Для его нахождения можно воспользоваться следующими данными

$u_{\text{о}}$	200	300	400	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
m (см п.10)	600	900	1200	1350	2400	3500	4200	6250	8100	10000

10 Определяют требуемое значение параметра m (см п 9), который представляет собой отношение площади сечения контактной зоны аппарата на уровне сечения касания к суммарной площади сопловых отверстий форсунок

$$m = F_a/\Sigma f_c$$

11 Рассчитывают площадь сечения контактной зоны аппарата на уровне сечения касания

$$F_a = \Sigma f_c m$$

В случае принудительной подачи воздуха площадь F_a определяют по принятой скорости движения воздуха $v_{вз}$.

$$F_a = V_г/v_{вз}$$

12 Принимают один из линейных размеров сечения контактной зоны, например длину L, и рассчитывают второй линейный размер – ширину B

13 Принимают число рядов (коллекторов) расстановки форсунок $N_р$ и находят число форсунок в каждом ряду $N_ф$

$$N_ф = n_ф/N_р$$

14 Рассчитывают расстояние между форсунками в каждом ряду $b = L/N_ф$, а расстояние от крайних форсунок до боковых стенок принимают равным $b/2$, находят расстояние между рядами $a = b/N_р$, расстояние от крайних рядов до стенок принимают равным $a/2$

15 Принимают высоту контактной зоны H, рекомендуемые значения которой в зависимости от d_c приведены ниже (эти данные отражают тот факт, что с увеличением диаметра сопла пропорционально возрастает диаметр капель, а следовательно, увеличивается и путь их полета, т е H)

d_c, мм	5	7	8	10	12	14	15	16	17	18	19	20
H, м	1,5	1,9	2,1	2,5	2,9	2,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5

Типы эжекционных устройств для охлаждения оборотной воды

По конструкционному оформлению все эжекционные охладители можно условно разделить на три группы полые охладители, охладители с интенсифицирующими элементами, эжекционные устройства для повышения эффективности действующих градирен Кроме того, в общем случае в зависимости от фазы, к которой подводится энергия, рассматриваемые аппараты подразделяют на *газо-эжекционные*, в которых энергия подводится к охлаждающему воздуху (вентилятором, газодувкой и т п), а вода эжектируется под его воздействием, *жидкостно-эжекционные*, в которые энергия подводится к диспергируемой на капли воде (эжектирующий газ), *жидкостно-газовые* (газо-жидкостные), в которых энергия подводится к обеим фазам И, наконец, эжекционные охладители можно различать по типу сепаратора он может быть выносным, совмещенным или встроенным

Абсолютное большинство конструкций относится к жидкостно-эжекционному классу Иногда при установке охладителя внутри производственного помещения и из-за связанного с этим существенного сопротивления

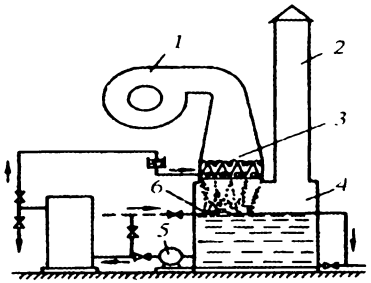


Рис 7 12 Газо-эжекционный охладитель воды
1 – вентилятор *2* – воздухоотводящая труба *3* – водораспределители *4* – сепарационная зона *5* – насос *6* – поплавковый клапан

воздуховодов во входных окнах (реже – после аппарата) устанавливают вентиляторы, т е аппараты выполняются жидкостно-газовыми Газо-эжекционный вариант охладителей воды встречается крайне редко

В аппаратах жидкостно-эжекционного и жидкостно-газового классов для ввода воды используют гидравлические форсунки, а в газо-жидкостных могут быть установлены как форсунки, так и различного рода распределители воды и оросители Аппараты малой производительности (до 10 м^3/ч) обычно выполняют однофорсуночными При более высоком расходе воды возможны два принципиально различных решения В одном случае на общем сепараторе крепят несколько (до десяти и более) однофорсуночных контактных элементов, а в другом в одной контактной зоне устанавливают необходимое число распылителей Очевидно, что в последнем случае аппарат получается более компактным, простым и дешевым

Как уже говорилось, охладители можно устанавливать и внутри производственных помещений Такое размещение оправданно только при сравнительно небольшой производительности аппарата и только тогда, когда разместить его снаружи не представляется возможным, или когда аппарат выполняет дополнительную специфическую функцию (например, подает отработанный воздух для увлажнения воздуха горячего цеха)

Пример газо-эжекционного охладителя с водораспределительными устройствами приведен на рис 7 12 Аппарат обеспечивает температурный перепад 7-15 °С и имеет размеры 1,5×1,4×2,5м при производительности 5-20 м^3/ч

Нагретая вода от охлаждаемого оборудования поступает через приемную воронку и коллектор в А-образные трубы водораспределителя и, выходя через прорези на гребнях, стекает по боковым граням в виде водяной пленки, которую нижние зубцы разбивают на отдельные струйки Подаваемый вентилятором *1* поток воздуха в сужающихся щелях постепенно увеличивает свою скорость и, встречаясь со струйками воды, дробит их на мелкие капли и одновременно обдувает За водораспределителем *3* скорость воздушного потока снижается капли воды укрупняются под воздействием инерционных сил и оседают в баке *4* Насосом *5* вода подается к охлаждаемому оборудованию, а отработанный воздух через воздухоотводящую трубу *2* выбрасывается в атмосферу

Варианты однофорсуночных аппаратов приведены на рис 7 13 Первые два (*а* и *б*) предназначены для установки внутри помещения, а последний – (*в*) для установки снаружи

Аппарат, показанный на рисунке *а*, имеет выносную зону сепарации, аппарат на рисунке *б* – встроенную. Для улучшения сепарации на входе в зону укреплены закручивающие лопатки 4, которые одновременно обеспечивают необходимую жесткость крепления контактной зоны 1 во внешней обечайке 2. Особенностью аппарата, показанного на рисунке *в*, кроме его наружного размещения, является направление факела распыла снизу вверх, это соответствует направлению движения воздуха, обусловленному разностью температур воздуха на входе в аппарат и выходе из него, и способствует росту эжекционного эффекта.

Вариант с фонтанирующим аппаратом (в дальнейшем будем называть так аппараты с направлением распыла снизу вверх) обеспечивает существенное увеличение времени контакта капель с воздухом, так как сила тяжести, направленная навстречу движению капель, способствует их торможению. Кроме того, стекающие с сетки *5* капли дополнительно контактируют со свежим воздухом. Таким образом, фонтанирующие аппараты должны быть компактнее аппаратов с направлением распыла сверху вниз. Однако высота подъема различных капель, их охлаждение будут различны, эти величины зависят от производительности аппарата.

Основные варианты аппаратов с несколькими однофорсуночными контактными элементами показаны на рис. 7.14*а-г*. Конструкция охладителя, приведенного на рис. 7.14*а*, еще тяготеет к традиционным башенным градирням. Над водосборной чашей *3* в центре установлена вытяжная башня-сепаратор *1*, вокруг нее размещены контактные элементы, имеющие профиль трубы Вентури.

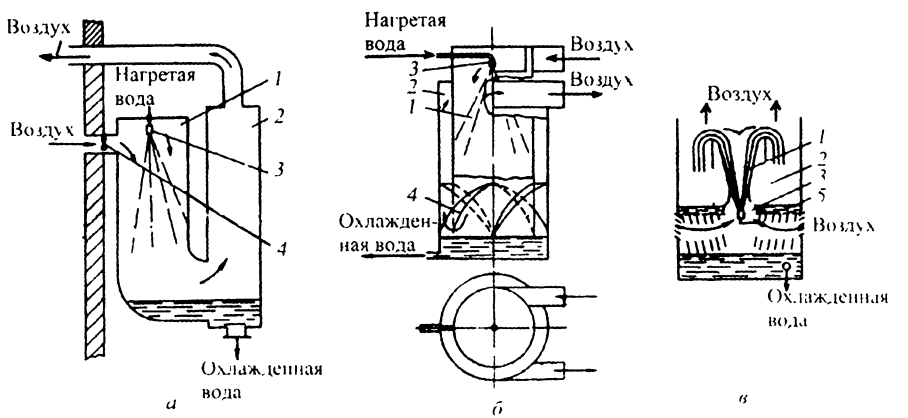


Рис. 7.13. Схемы однофорсуночных охладителей воды

а – с выносным сепаратором, *б* – со встроенным сепаратором, тангенциальным вводом и выводом воздуха и закруткой воздуха на входе в зону сепарации, *в* – фонтанирующий; 1 – зона контакта, 2 – зона сепарации, 3 – форсунка, 4 – закручивающие лопатки, 5 – сетка

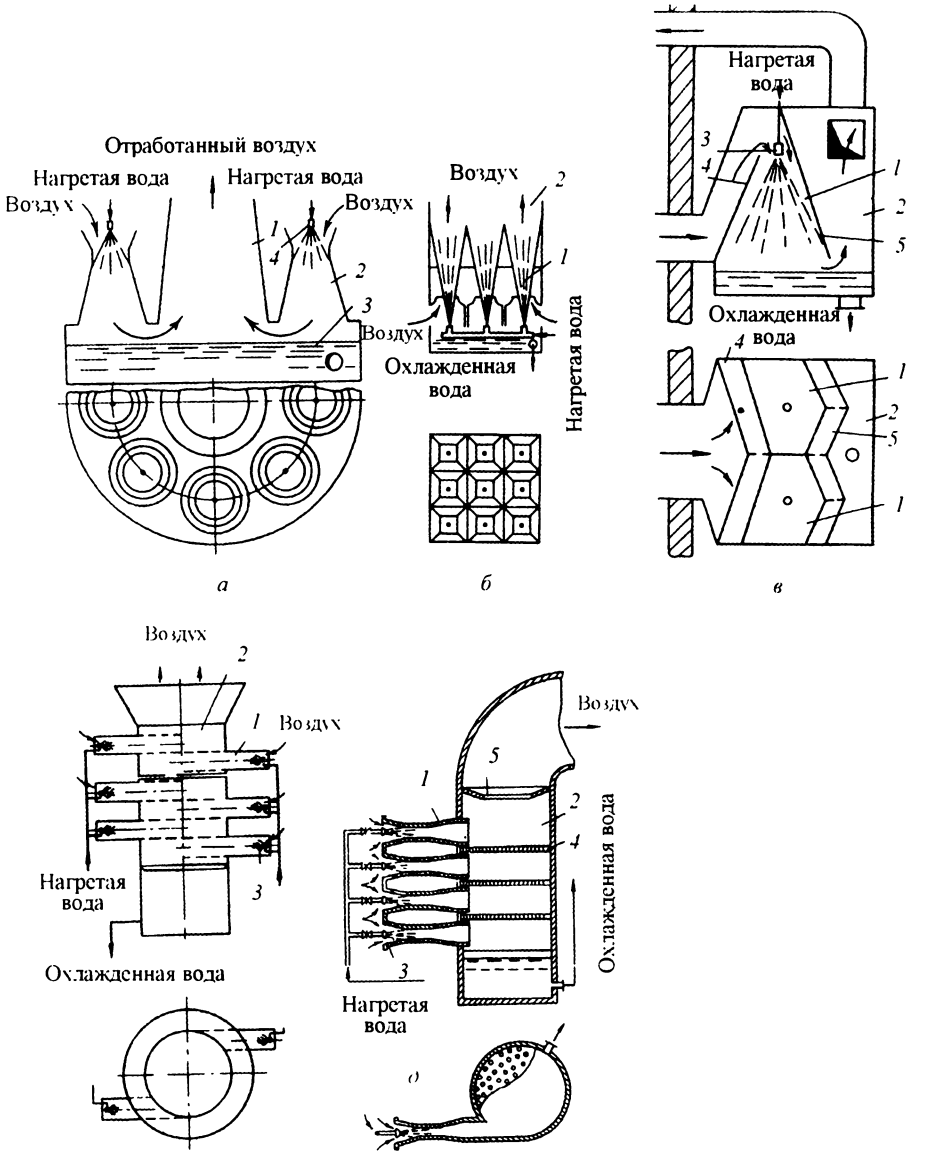


Рис 7 14 Схемы аппаратов с несколькими однофорсуночными контактными элементами

а – с контактными элементами Вентури *1* – вытяжная башня-сепаратор, *2* – элементы Вентури *3* – водосборная емкость *4* – форсунки, *б* – с фонтанирующими элементами *1* – зона контакта, *2* – зона сепарации, *в* – с элементами в виде контактных секций *1* – контактные секции *2* – зона сепарации *3* – форсунки, *4* – перегородка, отделяющая входной канал воздуха, *5* – перегородка, отделяющая зоны сепарации, – с элементами имеющими прямые стенки и тангенциально укрепленными на полой сепарационной башне *1* – контактные элементы *2* – сепарационная башня форсунки *д* – с элементами Вентури укрепленными тангенциально на сепараторе и прорезанными щелями в поперечном элементы Вентури *2* – сепаратор форсунки *4* – прорезанные щели *5* – каплеотбойное кольцо

Аппарат с фонтанирующими элементами Вентури квадратного сечения показан на рис 7 14*б* Элементы хорошо компонуются в вытяжной башне также квадратного (или прямоугольного) сечения На рисунке система жалюзийных каплеотделителей условно не показана

На рис 7 14*в* представлен аппарат с элементами в виде контактных секций Здесь зона контакта разделяется перегородкой на две контактные секции *1* с общей совмещенной зоной сепарации *2* Другой отличительной особенностью аппарата является нижний ввод воздуха и наличие, в связи с этим, второй перегородки *4* Такой аппарат предназначен для установки внутри помещения с ограниченной площадью

На рис 7 14*г* показан аппарат, в котором контактные элементы *1* тангенциально укреплены на сепарационнон башне *2* Тангенциальный ввод способствует лучшей сепарации капель, а также уменьшению габаритных размеров и трудоемкости изготовления

Аппарат, изображенный на рис 7 14*д*, сходен с предыдущим, однако элементы *1*, выполненные в форме трубы Вентури, предназначены только для эжекции воздуха, а испарительное охлаждение воды происходит в рабочей камере *2*, где установлены провальные тарелки *4*

Аппараты *г* и *д* имеют недостатки В первом (*г*) вследствие быстрого выпадения жидкости на стенки башни процесс практически не идет Для обеспечения требуемого охлаждения воды контактные элементы должны быть достаточно длинными (1,5-2,5 м), соответствующим должно быть и их крепление, т е аппарат против ожидания будет громоздким Значительным должен быть и перепад давления воды на форсунках, чтобы обеспечить "простреливание" всей длины контактного элемента По поводу конструкции *д* нужно отметить, что тут возможны два варианта

1) контактные элементы должны выполняться таких размеров, чтобы обеспечить необходимую эжекцию для требуемого охлаждения воды, и тогда процесс будет завершаться в самих элементах, а провальные тарелки становятся ненужными, т е аппарат будет полностью аналогичен предыдущему со всеми указанными недостатками, 2) при недостаточной эжекции даже при наличии тарелок аппарат не сможет обеспечить заданный перепад температур, найти применение подобные аппараты, вероятно, смогут в отдельных специфических случаях (например, в качестве индивидуальных охладителей агрегатов с весьма малой потребностью в воде – 1 $м^3$/ч и меньше)

Небольшое число вариантов разработано для случая, когда в одной контактной зоне установлено несколько распылителей

Известен аппарат, в котором принудительно подаются как охлаждаемая вода, так и охлаждающий воздух (рис 7 15) Аппарат выполнен в виде трубы Вентури, на его оси смонтирован блок из четырех форсунок, укрепленных на общей оси с лопастями вентиляторов Основной недостаток аппарата отработанный воздух выбрасывается ниже окон для его забора, что создает возможность повторного захвата отработанного воздуха Чтобы исключить подобную рециркуляцию воздуха, в сходной конструкции предусмотрен специальный экран

Первые эжекционные многофорсуночные градирни еще тяготеют к традиционным решениям В них (рис 7 16*а,б*), как правило, сохранена вытяжная башня, а форсунки расположены вертикально или горизонтально вокруг нее

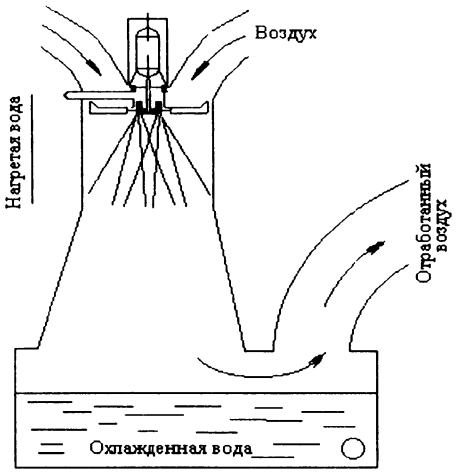


Рис 7 15 Газожидкостной многофорсуночный охладитель воды

Такое выполнение охладителей объяснятся еще и недостатками конструкции распыливающих устройств того времени (1950-1970-е гг), которые не позволяли обеспечить необходимый коэффициент эжекции Подобные конструкции едва ли найдут применение в новых разработках, но могут служить примером возможной перестройки действующих башенных и вентиляторных градирен

В схеме на рис 7 16*в* форсунки, размещенные во входных окнах, обеспечивают вместе с тягой башни расход воздуха, необходимый для охлаждения всей подаваемой в аппарат воды, основная масса которой поступает на распылители, установленные внутри башни, и движется навстречу охлаждающему воздуху (наличие противотока влечет за собой и связанные с ним недостатки) В многофорсуночном охладителе (рис 7 16*г*) фонтанирующего типа форсунки установлены в нижней части вытяжной башни, а для отделения капель на выходе из последней предусмотрены жалюзи

Общий недостаток описанных конструкций заключается в том, что при высоких производительностях (5000 м^3/ч и более) они становятся громоздкими и по капитальным затратам могут значительно превосходить башенные градирни Поэтому значительный интерес представляет следующее решение (рис 7 17)

Градирня выполняется в виде трапецеидальной шахты, служащей сепарационным устройством, а рабочими являются ее боковые поверхности, на которых укрепляются наклонные жалюзи, образующие прямоугольные горловины эжекторов Напротив горловин на коллекторах устанавливают центробежно-струйные форсунки Такая схема имеет ряд преимуществ Во-первых, градирня значительно компактнее охладителей с горизонтальной рабочей поверхностью, в том числе и традиционных градирен Во-вторых, она весьма удобна в обслуживании, так как все форсунки вынесены наружу и легко доступны для ремонта и осуществления контроля за их состоянием В-третьих, ее легко секционировать как по вертикали, так и по горизонтали соответствующей обвязкой коллекторами

Схема собрана таким образом, что вода нижних ярусов охлаждается до заданной температуры до входа в шахту, а вода верхних ярусов доохлаждается в шахте Чем выше установлены форсунки, тем под меньшим давлением будет вода перед ними и грубее распыл Но при этом возрастает длина полета капель, что способствует охлаждению до заданной температуры

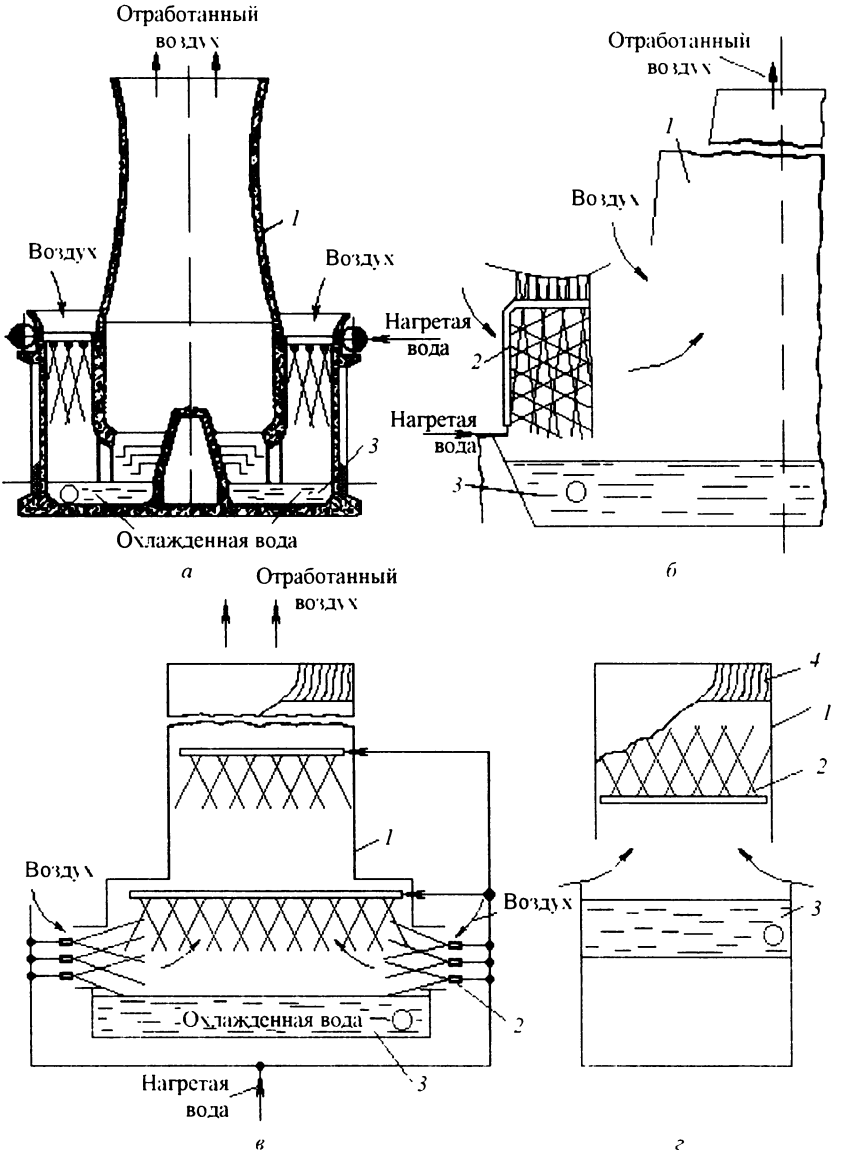


Рис 7 16 Многофорсуночные охладители с вытяжной башней

а – с горизонтальным размещением форсунок во входных окнах по кольцу *б* – с вертикальным размещением форсунок во входных окнах по кольцу вокруг башни, *в* – с вертикальным размещением форсунок во входных окнах – фонтанирующего типа *1* – вытяжная башня, *2* – форсунки, *3* – водосборная чаша *4* – жалюзи

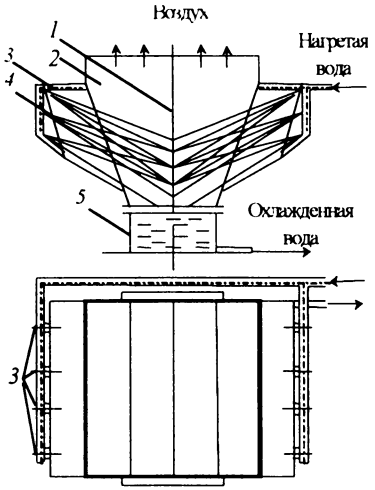


Рис 7 17 Эжекционная градирня с рабочей боковой поверхностью

1 – продольная перегородка, *2* – сепарационная шахта, *3* – форсунки, *4* – факелы распыленной воды, *5* – водосборная емкость

Загрубление распыла при переходе от яруса к ярусу вверх позволяет решить еще одну задачу – уменьшить механический унос капель, так как крупные капли верхних ярусов будут улавливать мелкие частицы, транспортируемые воздухом Для исключения резкого роста скорости воздуха, обусловленного увеличением его расхода в направлении движения (снизу вверх), шахта сделана расширяющейся

Эжекционные охладители особенно перспективны в локальных системах водооборота с расходом воды до 500 м^3/ч, так как значительно превосходят по эффективности все известные малые охладители Для оценки экономической целесообразности применения подобных аппаратов вместо градирен высокой производительности (1000 м^3/ч и выше) были выполнены проекты и сметные расчеты аппарата, соответствующего схеме на рис 7 10, на производительность 10000 и 1280 м^3/ч Сопоставление проводили с каркасно-обшивной (самой дешевой) башенной градирней производительностью 10000 м^3/ч и с вентиляционной градирней производительностью равной 1280 м^3/ч1 Результаты сравнений (табл 7 5) показали, что эжекционная градирня существенно компактнее, требует значительно меньшей производственной площади и меньших затрат Она лишь в ряде случаев незначительно уступала башенной градирне по эксплуатационным затратам, обусловленным необходимостью установки насосов с более высоким напором Однако ремонт ее значительно проще, дешевле и, самое главное, требует очень небольшого времени, т е простой потребителей (или снижение их мощности) непродолжителен, и, следовательно, по этому показателю эжекционные охладители окажутся предпочтительнее

Аппарат, показанный на рис 7 14*в*, реализован на Ярославском заводе "Оргтехника" для охлаждения оборотной воды компрессорной станции Этот вариант использован в связи с тем, что в работе могут находиться либо один, либо два компрессора (рис 7 18) Соответственно подключаются одна или обе секции Схема его размещения и обвязки показана на рис 7 18 *а,б* Суммарный расход воды через охладитель достигает 6 м^3/ч (до 3 м^3/ч на секцию), рабочий перепад давления 0,25 МПа Основные размеры аппарата ширина 1,2 м (по 0,6 м каждая секция), длина1,2 м, высота 2,25 м, диаметр сопла форсунок 0,08 м, высота контактной зоны 1,6 м

Таблица 7 5 Сравнительные исходные показатели эжекционных охладителей, башенных градирен и вентиляционных градирен

Показатели	Башенная градирня	Вентиляционная градирня	Эжекционные охладители	
			1	2
Производительность, $м^3/ч$	10000	1280	10000	1280
Оборудование	3 насоса 24НДН	5 вентиляторов 1ВГ-50, 1 насос 24НДН на 3 градирни	2 насоса 24НДС	1 насос 24НДС
Размеры, м	$D = 50$; $H = 55$	40×8×10	50×18×22,5	28×6×10
Капитальные затраты, усл ед	23,0	1,0	7,2	0,9
Эксплуатационные затраты, усл ед	7,0	1,0	8,0	0,92
Приведенные годовые затраты, усл ед	8,7	1,0	8,0	0,92

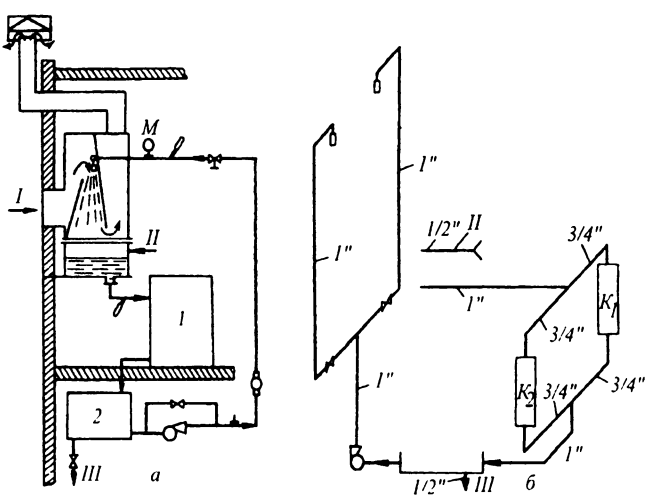


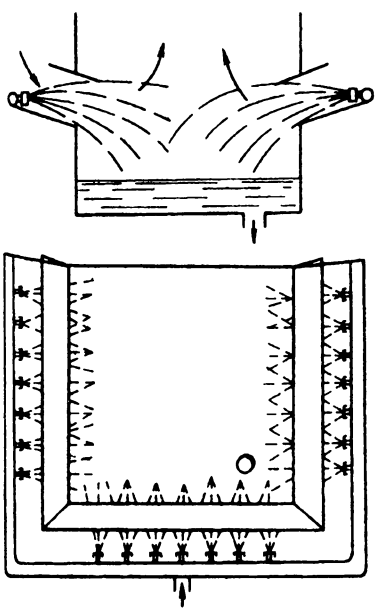
Рис 7 18 Использование секционного охладителя в компрессорной станции

а – схема установки охладителя *б* – схема водопроводов (K_1 K_2 – компрессоры) *I* – воздух *II* – подпитка из водопровода (10% от расхода) *III* – дренажный сброс *1* – компрессор *2* – бак нагретой воды

Аппарат рассчитан на обеспечение перепада температуры до 15 градусов (по результатам испытаний перепад температур составляет 12÷18°) Для компенсации сопротивлений газоходов во входном окне (0,6×0,4 м) установлен осевой вентилятор № 4

На рис 7 19 дана схема охладителя воды, построенного на базе ранее существовавшего брызгального бассейна; охладитель является однорядным вариантом аппарата, показанного на рис 7 17 При реконструкции бассейна высоту его стенок увеличили деревянной обшивкой до 2,5 м, с трех сторон оставили окна с жалюзи, а на коллекторе укрепили форсунку с соплом диаметром 5 мм Рабочий перепад давления воды на форсунках 0,2 МПа, а их суммарная производительность 25 $м^3$/ч Испытания показали, что при начальной температуре воды 24-28 °С перепад температур составляет 8-12 °С (брызгальный бассейн обеспечивал 2-3 °С)

Представляет интерес охладитель с механическим дисковым распылителем (рис 7 20) Он рассчитан на производительность до 2,2 $м^3$/ч и обеспечивает перепад температур 8-10 градусов Распыливающий диск диаметром 200 мм укреплен на валу осевого вентилятора № 4 Такие аппараты представляются особенно перспективными при работе на сильно загрязненной воде



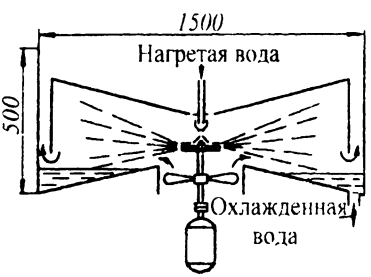


Рис 7 19 Многофорсуночный охладитель, построенный на базе брызгального бассейна
Рис 7 20 Охладитель воды с механическим дисковым распылителем

7.4. Сдвоенные теплообменные аппараты

В технологических процессах (например, при переработке нефти) часто возникает необходимость охлаждения промежуточных и конечных продуктов С учетом требований охраны окружающей среды для этого используют воздушные холодильники или теплообменники, в которых в большинстве случаев охлаждающим агентом служит оборотная вода из централизованной системы

Воздушные холодильники отличаются повышенной чувствительностью к температуре окружающего воздуха, и в теплые периоды года эффективность их существенно снижается Однако во многих производствах (в том числе и в нефтепереработке) имеется большое число тепловыделяющего оборудования, которое зачастую размещают вместе с теплообменниками, так что при этом создается микроклимат с повышенными температурами Поэтому воздушные холодильники на большей части территории страны оказываются малоэффективными К другим их недостаткам следует отнести низкие коэффициенты теплопередачи, а отсюда – громоздкость сооружения, сложная конструкция трубок, требующих специального оребрения, большие удельные расходы воздуха, на транспортировку которого затрачивается значительное количество электроэнергии, кроме того, воздушные теплообменники сложны и трудоемки в обслуживании и ремонте.

Недостатки существующих охладителей воды содержат в себе недостатки централизованных водооборотных систем в целом, а также недостатки, присущие собственно теплообменным кожухотрубным аппаратам

К основным недостаткам централизованных систем охлаждения промежуточных и конечных продуктов большинства производств относятся

– сложность и высокая стоимость системы трубопроводов и градирен,

– невозможность учета индивидуальных требований потребителей к воде в отношении ее температуры, чистоты и т п , к регламенту работы (система не реагирует на изменение производительности или отключение отдельных потребителей),

– сложность, а часто и невозможность замены воды в системе, в связи с чем даже при наличии очистных устройств вода содержит большое количество загрязнителей, которые отрицательно влияют на состояние и эффективность работы потребителей (например, нефтепродукты, соли, кислоты, механические примеси и т п),

– высокие затраты электроэнергии, обусловленные необходимостью перекачки на значительные расстояния больших масс воды

Повышенные объемы циркулирующей воды связаны, во-первых, с низкой охлаждающей способностью традиционных градирен (перепад температур не выше 5 градусов), во-вторых, со снижением эффективности теплобомена, обусловленным присутствием в воде различных загрязнителей, в-третьих, с низкой эффективностью традиционных теплообменников (коэффициенты теплопередачи наиболее эффективных кожухотрубных теплообменников в данных условиях не превышают 400 Вт/(м^2·К))

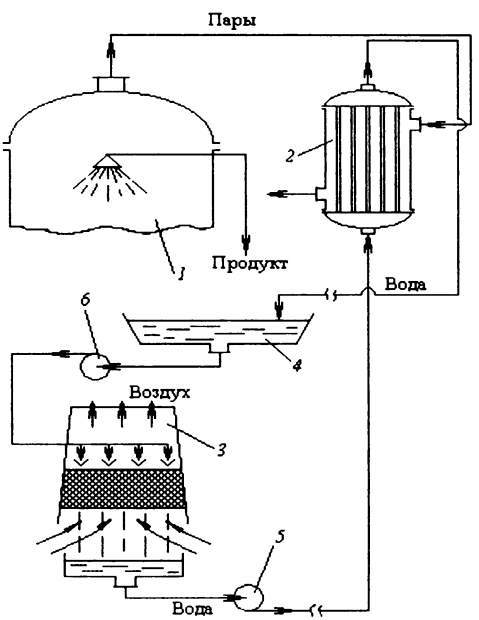
Отказ от централизованных водооборотов и переход к локальным с использованием высокоэффективных теплообменных аппаратов помогут решить многие актуальные задачи промышленности

Подобные локальные системы, где одновременно охлаждаются технологическая жидкость и оборотная вода, можно организовать, применив аппараты типа ОВЖ (охладитель воды и жидкости), содержащие, по существу, два теплообменника, в одном из которых вода охлаждается в результате теплообмена с воздухом и испарения, а в другом тепло отводится к воде от технологической жидкости

В двухступенчатых системах циркулируют, как правило, три теплоносителя два из них движутся по замкнутым контурам и используются далее в технологической схеме, или их отбирают в виде готового продукта

Поясним это на примере работы ректификационной колонны Пары продукта (например, бензина) из ректификационной колонны направляются в дефлегматор (обычно это кожухотрубный теплообменник), где конденсируются и в виде жидкости частично отбираются как готовый продукт (или полупродукт), а частично возвращаются в колонну на орошение Тепло конденсации передается через стенки трубок к воде, т е образуется первая теплообменная ступень Нагретая вода поступает в градирню, где отдает тепло охлаждающему воздуху (вторая теплообменная ступень) и возвращается в теплообменник

Описанный пример (см схему на рис 7 21) отражает довольно общий случай Разница может быть лишь в том, что вместо паров из колонны (или другого технологического аппарата) может выводиться нуждающийся в охлаждении жидкий продукт, продукт может направляться не в межтрубное пространство теплообменника, а в трубный пучок – тогда вода подается в межтрубное пространство



Важное преимущество двухступенчатых систем – утилизация тепла вторичных энергетических ресурсов (вентиляционных и дымовых газов, сбросного пара, горячей технической воды и т п) Поясним это схемой, приведенной на рис 7 22

Рис 7 21. Примерная схема двухступенчатой системы теплообмена

1 – ректификационная колонна, *2* – теплообменник (дефлегматор), *3* – градирня, *4* – емкость для воды *5, 6* – насосы

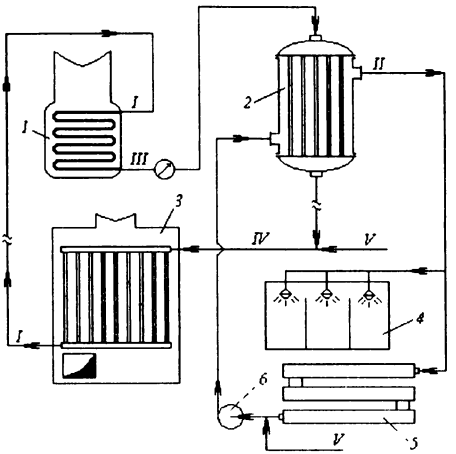


Рис 7 22 Двухступенчатая система утилизации тепла отработанного пара
I – пар, *II* – нагретая вода, *III* – отработанный пар, *II'* – конденсат, *I'* – подпитка Остальные пояснения в тексте

Отработанный пар после ректификационной колонны *1* направляется в теплообменник *2*, где отдает тепло воде, а образовавшийся конденсат направляется в паровой котел *3* (котельной завода, районной котельной или ТЭЦ) и снова направляется в колонну Горячая вода из теплообменника *2* подается к потребителям (душевые установки *4*, система водяного отопления *5*), где охлаждается и насосом *6* снова подается в теплообменник

Еще одной областью целесообразного использования двухступенчатых систем является утилизация тепла горячих газов

Двухступенчатые системы теплообмена можно применять для охлаждения рабочей жидкости гидроприводов При их работе выделяется тепло, кроме того в цехе, где установлен гидропривод, может быть высокая температура, поэтому рабочая жидкость нагревается При перегреве возможно термическое разложение жидкости, продукты разложения, оседая на стенках рабочих цилиндров, забивают регулирующую аппаратуру и выводят гидропривод из строя При перегреве рабочей жидкости снижается ее вязкость, усиливается износ сопрягаемых деталей и старения различных элементов (материалов уплотнений, термоизоляции, различного рода покрытий), увеличиваются потери и переток жидкости через уплотнения, снижается КПД гидропривода

В традиционных схемах с применением теплообменных аппаратов жидкость охлаждается за счет теплоотдачи в окружающий воздух при циркуляции ее по трубопроводам (рис 7 23*а*), при этом верхний предел рабочей температуры составляет 70-80 °С При водяном охлаждении в насосных станциях гидроприводов (рис 7 23*б*, *в*) верхний предел рабочей температуры снижается до 50-60°С В этом случае имеется второй открытый водяной контур (первый контур – закрытый, по нему движется рабочая жидкость, воду обычно пропускают по змеевику, помещенному в емкости, куда сливается рабочая жидкость Нагретая вода направляется на градирню, где происходит испарительное охлаждение при взаимодействии с атмосферным воздухом (поэтому контур и называется открытым) Однако в этих случаях охлаждение рабочей жидкости неэффективно, так как интенсивность охлаждения невелика

В теплообменнике для охлаждения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) также используют оборотную воду, которая в теплое время года име-

ет повышенную температуру (30-35 °С), поэтому охлаждение СОЖ оказывается недостаточным При перегреве СОЖ растет процент брака выпускаемой продукции, так как не выдерживаются линейные размеры вследствие высокой температуры деталей, ухудшается чистота обработки поверхности, СОЖ разлагается и теряет свои смазочно-охлаждающие свойства Кроме того, возрастают потери СОЖ, поскольку увеличивается ее испарение, загрязняется атмосфера цеха, ухудшаются условия труда

Поэтому во многих случаях летом вместо оборотной воды, которая к тому же в централизованных системах сильно загрязнена и быстро забивает трубки теплообменников, для охлаждения используют водопроводную или техническую воду, нагретую воду сбрасывают в канализацию, в результате чего резко увеличивается потребление воды

Ограниченное использование двухступенчатых систем обусловлено следующими причинами

– низкой эффективностью, высокой металлоемкостью, громоздкостью, сложностью обслуживания и ремонта, высокой стоимостью традиционного теплообменного оборудования, снижением коэффициентов теплопередачи в процессе эксплуатации вследствие коррозии трубок со стороны воды, образования накипи и отложения продуктов,

– низким качеством оборотной воды в централизованных системах, недостаточным охлаждением воды, высоким уровнем загрязнения и засоления воды вследствие невозможности или трудности замены ее в централизованных системах, высокими капитальными затратами, значительными энергетическими затратами, связанными с необходимостью перекачивания воды на большие расстояния, невозможностью учета регламента работы и загрузки потребителя,

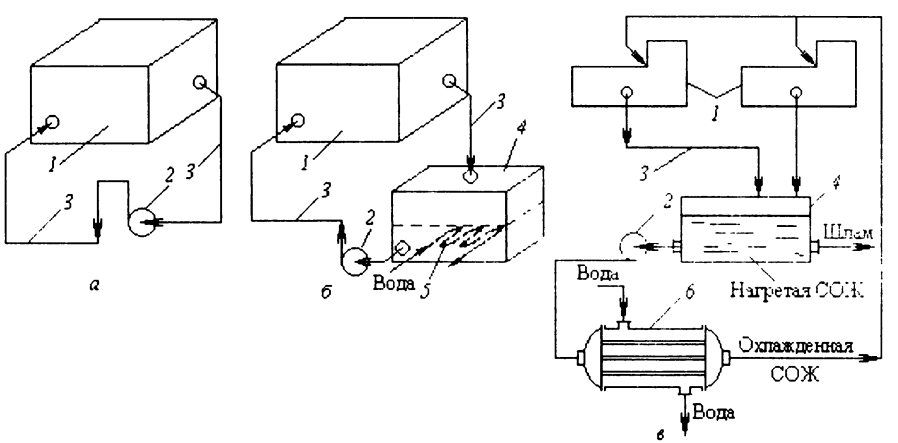


Рис 7 23 Варианты организации охлаждения технологических жидкостей

а – циркуляция по трубопроводам *б, в* – со вторым водяным контуром (*б* – с погруженным змеевиком, *в* – с кожухотрубным теплообменником). *1* – тепловыделяющее оборудование *2* – насос *3* – трубопроводы *4* – бак-отстойник, *5* – змеевик, *6* – теплообменник

– низкой эффективностью теплоотдачи от горячих газов к стенке теплообменника при утилизации их тепла

В последние годы разработаны высокоэффективные сдвоенные прямоточные распылительные теплообменники, показатели работы которых открывают широкие возможности их внедрения в нефтеперерабатывающую, нефтехимическую и химическую промышленность В сдвоенных прямоточных распылительных аппаратах объединены обе ступени теплообмена, который осуществляется между тремя теплоносителями газом (воздухом) и водой, а также между водой и жидкостью

Вторая пара теплоносителей обычно обменивается теплом в той части аппарата, которая подобна оросительному теплообменнику Традиционный оросительный теплообменник содержит горизонтальные, размещенные одна над другой трубы, которые располагают обычно в виде нескольких параллельных секций с общим коллектором для подачи и отвода охлаждаемой (нагреваемой) жидкости Сверху трубы орошаются водой, равномерно распределяемой по их длине (например, через желоба с зубчатыми краями) Отработанная вода отводится из поддона, установленного под трубами

Вода из желоба сначала попадает на верхнюю трубу, образуя на ней пленку определенной толщины в зависимости от удельного расхода воды и размеров трубы, частично нагревается (или охлаждается), стекает на следующую трубу, расположенную ниже, и т д Такой теплообменник прост по конструкции, доступен для наблюдения и чистки Ремонт теплообменника, чистка внутренней полости труб также не представляют особых трудностей для этого достаточно снять соединительные калачи (в кожухотрубных теплообменниках с этой целью приходится снимать тяжелые многоболтовые крышки) В оросительном теплообменнике, в отличие от кожухотрубного, отсутствуют толстостенный кожух, крупные фланцы и трубная плита, поэтому он имеет сравнительно малую материалоемкость и прост в изготовлении

Однако, при перетекании воды с верхних труб на нижние уменьшается средняя разность температур (движущая сила процесса теплообмена) между водой и поверхностью труб (вода нагревается) Интенсивность теплообмена довольно низкая, так как скорость течения воды невысока Кроме того, равномерно орошаются только верхние трубы, орошение нижних неравномерно Все это является причиной низкой эффективности оросительных теплообменников .

В последние годы разработаны аппараты, в которых оросительный теплообменник является составной частью комплексного сдвоенного теплообменника и располагается под форсунками В этом аппарате вода (обычно техническая) распыляется форсунками, образуя факел, состоящий из капель Факел эжектирует, увлекает окружающий его газ или воздух, при этом происходит распределение газа по сечению факела пропорционально количеству капелек и их массе Капли воды на пути от форсунок к трубкам оросительного теплообменника взаимодействуют с газом и охлаждаются или нагреваются (рис 7 24)

Трубки теплообменника расположены в 1-2 ряда так, чтобы на каждую из них попадали прямолетящие неотраженные капли воды

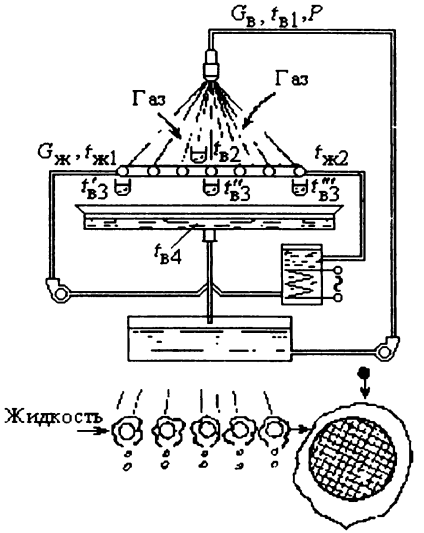


Рис 7 24 Сдвоенный прямоточный распылительный аппарат (экспериментальная установка)

Капли бомбардируют пленку воды, стекающую по поверхности трубок, частично разрушают ее, турбулизуют и перемешивают, обновляя поверхность теплоотдачи Все это существенно интенсифицирует процесс теплообмена между пленкой воды и поверхностью трубок Вода нагревается (или охлаждается), попадает в емкость. фильтруется (отстаивается, нейтрализуется и т п) и подается на форсунки

В Ярославском государственном техническом университете были проведены исследования на экспериментальной установке, представляющей собой однофорсуночный элемент промышленного масштаба (см рис 7 24) В экспериментах контролировали расходы сред и их температуры, а параметры варьировали в следующих пределах диаметр сопла форсунки – от 6 до 17 мм, перепад давления на них – от 0,05 до 0,62 МПа, температура жидкости в трубах – от 20 до 95 °С При этом использовали различные жидкости воду, керосин и масло И-20

По результатам экспериментов рассчитывали частные коэффициенты теплоотдачи и общий коэффициент теплопередачи В экспериментах форсунку устанавливали на таком расстоянии от плоскости размещения трубок, чтобы факел полностью закрывал площадь, в пределах которой размещены трубки Количество жидкости, попадающей на трубки ($V_{в1}$), определяли с учетом доли поверхности (в плане) трубок от общей площади факела в этом сечении

$$V_{в1} = V_в F_1 / F_ф,$$

где $V_в$ – общий расход жидкости через форсунку, F_1 и $F_ф$ – площади трубок и факела соответственно

Коэффициент теплоотдачи в трубках α_1 вычисляли по известному критериальному уравнению

$$Nu = 0{,}021\,Re_1^{0,8} Pr_1^{0,43}$$

Среднюю температуру жидкостной пленки на трубках определяли как среднее арифметическое между температурой падающих на трубки капель ($t_{в2}$) и стекающей с них воды ($t_{в3}$, $t'_{в3}$, $t''_{в3}$) Температуру в экспериментах измеряли термопарами и регистрировали многоточечными потенциометрами

Показания манометров и расходомера отмечали на тех же диаграммных лентах, что обеспечивало одновременность замеров

В процессе исследований изучали

– влияние диаметра сопла форсунки на изменение расхода воды и размеры капель,

– перепад давления воды на форсунках, обусловливающий размер образующихся капель, их скорость и расход воды,

– расход жидкости через трубки и ее теплофизические параметры, обусловливающие изменение критериев $Re_т$, $Pr_т$,

– изменение начальной температуры жидкости $t_{ж1}$, влияющей на ее физические свойства, и движущую силу процесса,

– изменение температуры падающих на трубчатку капель

Изучалось также влияние отражательных элементов и устройств на вторичное дробление капель

Испытания показали, что при подаче в трубки керосина во всех случаях коэффициент теплопередачи заметно падает, что объясняется большей вязкостью и меньшей плотностью керосина по сравнению с водой и соответствующим уменьшением коэффициента теплоотдачи в трубках Увеличение диаметра сопла форсунок приводит к повышению плотности орошения и формированию более энергичных капель, определяющих рост эффективности теплообмена К аналогичному результату приводят увеличение перепада давления воды (p) на форсунках, так как его рост вызывает увеличение скорости истечения. Повышение расхода жидкости ($G_ж$) через трубчатку также вызывает рост коэффициента теплопередачи Здесь, как и в случае перехода от керосина к воде, возрастает критерии Рейнольдса для трубок, а следовательно, и коэффициент теплоотдачи Изменение температуры жидкости, поступающей в трубчатку, практически не отражается на эффективности теплообмена

Конструктивное оформление сдвоенных распылительно-оросительных теплообменников может быть достаточно разнообразным. По способу подачи газовой фазы можно выделить аппараты, работающие в режиме самоэжекции, и аппараты, в которых газ подается принудительно внешним тягодутьевым устройством (вентилятором, газодувкой, дымососом) Предложен ряд вариантов конструктивного оформления аппаратов с принудительной подачей воздуха

Различия тут непринципиальные и касаются организации движения воздуха Аппарат, показанный на рис 7 25, позволяет в результате принудительной подачи дымовых газов рекуперировать их тепло

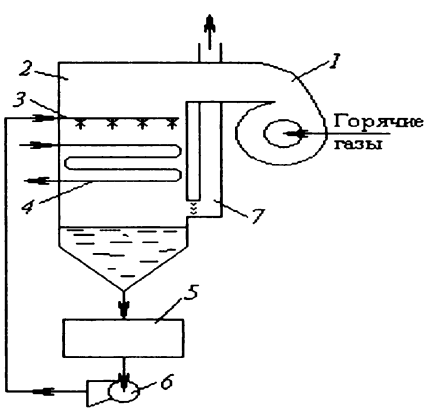


Рис 7 25 Сдвоенный теплообменник с принудительной подачей газа внешним вентилятором

Дымовые газы вентилятором *1* подаются в корпус аппарата *2* Взаимодействуя с каплями промышленной жидкости, распыляемой форсунками 3, газ охлаждается и очищается Нагретая вода открытого контура орошает змеевик *4*, отдает тепло жидкости закрытого контура и сливается в нижнюю часть аппарата Очищенный и охлажденный газ по газоходу *7* выбрасывается в атмосферу, а загрязненная промывная жидкость проходит через регенератор *5* и насосом *6* вновь подается на форсунки

Охлаждение газов способствует не только рекуперации тепла, но и повышению эффективности их очистки например, при снижении температуры газа с 80 до 20 °С эффективность извлечения диоксида серы повышается в четыре раза

Разработан типоразмерный ряд КТАН – утилизаторов для котлов, работающих на газе (рис 7 26*а, б*) Их характеристики и основные размеры приведены в табл 7 6 - 7 9

Интенсивный сдвоенный теплообменник (рис 7 27) работает следующим образом

Через патрубок *2* в трубы подают для охлаждения одну из рабочих сред, например флегму ректификационной колонны Флегма отводится через патрубок *14* и используется в следующем технологическом процессе или для рециркуляции Одновременно в межтрубное пространство подают охлаждающую среду, например воду Через барботер *5* поступает сжатый воздух, а через оросить *10* – вода В межтрубном пространстве воздух (охлаждающая среда) барботирует через слой воды, интенсифицируя теплообмен Отработанный воздух отводится в сепаратор *11* для его отделения от захваченной воды и удаляется в атмосферу, а вода направляется для повторного использования В результате конвективного теплообмена через стенку одна из сред охлаждается, а другая нагревается Расположение на кожухе дополнительных патрубков позволяет регулировать поверхность, участвующую в процессе теплообмена, а размещение оросителя в верхней части теплообменника осуществляется независимо от его высоты

На рис 7 28 показан сдвоенный горизонтальный теплообменник, предназначенный для утилизации тепла горячих отработанных газов На рисунке *а* изображен продольный разрез теплообменника, в котором сопла образуются между экранами и общими перегородками, на рисунке *б* разрез *А-А*, на рисунке *в* – теплообменник, в котором сопла образуются между экранами и стенками патрубков

Аппарат *1* с входными (*8* и *15*) и выходными (*5* и *12*) патрубками для подачи свежего и отработанного теплоносителя (теплого и холодного потоков) и их выхода имеет ротор установленный внутри корпуса *1* и выполненный в виде овала *4* с дисками *2*, закрепленными на валу параллельно потокам Вал *4* полый, на его внутренней поверхности закреплено оребрение *3*, выполненное в виде кольцевых перегородок Полость вала *4* заполнена теплоносителем (рабочей жидкостью), герметизирована и представляет собой горизонтально расположенный термосифон с внутренним оребрением *3* Патрубки *5, 8, 12, 15* имеют по одной общей перегородке *6, 13* Внутри входных патрубков *8* и *15* размещены наклонные направляющие экраны *9* и *16*, расположенные под углом к осям симметрии патрубков *8* и *15* и общим перегородкам *6* и *13* таким образом, что образуют с перегородками или противолежащими стенками патрубков сужающиеся плоские сопла *7* и *14* прямоугольного сечения с выходными отверстиями *10* и *11* Сопла *7* и *14* могут иметь косой срез или,как вариант,прямой

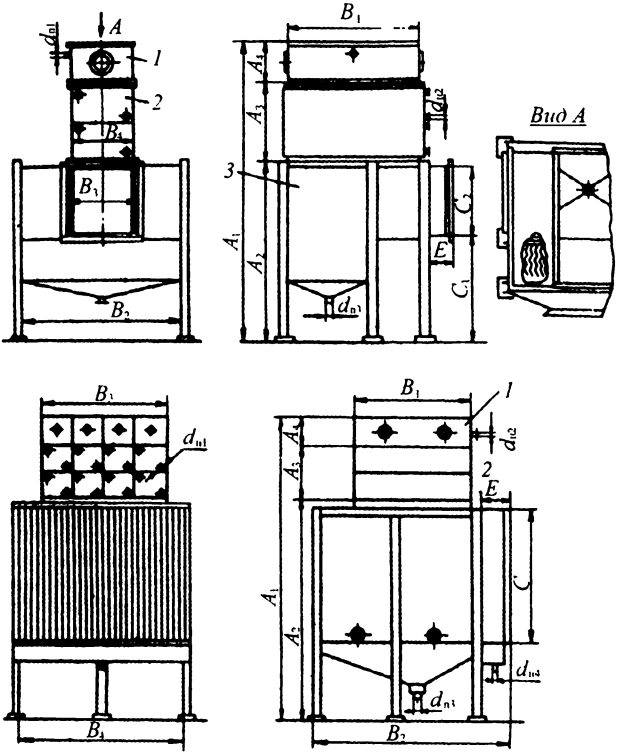


Рис 7 26 Схемы аппарата КТАН

а – модификация *I*, *б* – модификация *II*, *1* – блок системы орошения, *2* – блок активной насадки, *3* – сепарационный узел

Рис 7 27 Сдвоенный трубчатый теплообменник

1 – кожух, *2* – патрубки *3 13* – раздающий и собирающий коллекторы, *4 12* – нижняя и верхняя трубы доски, *5* – барботер, *6* – патрубок для подвода среды в межтрубное пространство, *7* – трубчатка, *8* – вентиль, *9* – дополнительный патрубок, *10* – ороситель, *11* – сепаратор, *14* – патрубки для отвода среды из трубного пространства, *14* – патрубок для отвода среды из межтрубного пространства

Таблица 7 6. Характеристики КТАН-0,05УГ-0,80УГ (модификация I)

КТАН	Тип котлоагрегата	Теплопроизводительность, МВт	Расход нагреваемой воды, т/ч (номинальный)
КТАН-0,05УГ	Е-0,2/9Г; Е-0,4/9Г (МЗК-8Г), П-0,4/9Г (МЗК-3Г); МЗК-2Г	0,006-0,06	1,0
КТАН-0,1УГ	МЗК-1Г, П-1/9Г (МЗК-6Г), Е-1/9-1Г (МЗК-1Г), Е-1/9Г (МЗК-7Г)	0,01-0,1	2,5
КТАН-0,25УГ	МГК-1/18, УВК-1,6; РК-1,6, ДКВР-25-13, ДЕ-4-14ГМ	0,03-0,3	6,0
КТАН-0,5УГ	КВ-ГМ-4; ДКВР-4-13; ДЕ-6,5-14ГМ	0,06-0,6	12,0
КТАН-0,8УГ	КВ-ГМ-6,5; ДКВР-6,5-13; ДЕ-10-14ГМ	0,1-1,0	20,0

Примечание Температура нагреваемой воды на входе 5-20 °С, на выходе 45-50 °С

Таблица 7 7 Основные размеры КТАН-0,05 – 0,8УГ (в мм, см рис 7 26)

Обозначение размера	КТАН-0,8УГ	КТАН-0,5УГ	КТАН-0,25УГ	КТАН-0,1УГ	КТАН-0,05УГ
A_1	3730	3300	2900	1900	1700
A_2	2300	2000	1600	1000	800
A_3	930	800	200	600	600
A_4	500	500	500	300	300
B_1	1560	1000	1000	400	400
B_2	1900	2220	1400	1020	510
B_3	630	800	600	400	200
B_4	630	720	350	220	110
C_1	1430	1600	1200	900	700
C_2	810	400	400	100	100
d_{n1}	45	25	25	18	18
d_{n2}	76	45	45	25	25
d_{n3}	108	76	57	32	25
E	200	300	200	200	200

Таблица 7 8 Характеристики КТАН-1,5УГ-12УГ (модификация II)

КТАН	Тип котлоагрегата	Теплопроизводительность, МВт	Расход нагреваемой воды, т/ч (номинальный)
КТАН-1,5УГ	КВ-ГМ-10, ДКВР-10-13, ДЕ-16-14ГМ	0,2-0,7	30
КТАН-2,3УГ	Е-35-40ГМ, КВ-ГМ-20; ДКВР-20-13, ДЕ-25-14ГМ	0,3-3,0	75
КТАН-4,5УГ	КВ-ГМ-30; ТВГМ-30; ДКВР-35-13; Е-50-14/40ГМ	0,5-6,9	140
КТАН-6УГ	КВ-ГМ-50; ПТВМ-30М, ПТВМ-50, Е-75-14/40ГМ, Е-100-14/24	0,7-7,0	150
КТАН-12УГ	КВ-ГМ-100, ПТВМ-100; Е-160-24	1,4-14,0	300

Примечание Температура нагреваемой воды на входе 5-20 °С, на выходе 45-50 °С

Таблица 7 9 Основные размеры КТАН-1,5-12УГ (в мм; см. рис 7 26)

Обозначение размера	КТАН-12УГ	КТАН-6УГ	КТАН-4,5УГ	КТАН-2,3УГ	КТАН-1,5УГ
A_1	5850	5850	5350	4850	4140
A_2	4300	4300	3800	3300	2710
A_3	1010	1010	1010	1010	930
A_4	550	550	550	550	500
B_1	2320	2320	2320	2320	1560
B_2	3880	3880	3880	3580	2680
B_3	4640	2320	1740	1160	1260
B_4	6500	3250	2670	2160	1260
C	2599	2590	2890	1590	1000
d_{N1}	76	76	76	76	76
d_{n2}	89	89	89	89	45
d_{n3}	159	159	133	108	89
d_{n4}	89	89	76	57	45
E	450	450	450	450	430

Примечание Блок активной насадки и системы орошения собирают на двух блоках КТАН – 08УГ

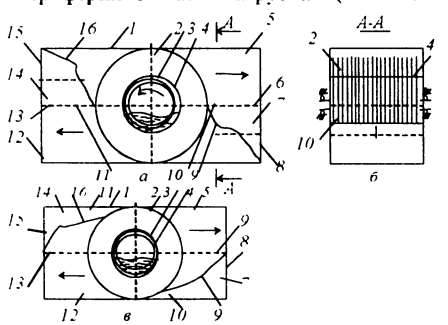
Сопла образованы экранами *9* и *16* и стенками патрубков *8* и *15*, противоположными перегородками *6* и *13* В этом случае срез сопел находится в периферийной (по отношению к оси ротора) части патрубков Экраны *9* и *16* выполнены в виде S-образно изогнутых пластин (S-образная форма – в сечении, перпендикулярном оси ротора)

Теплообменник работает следующим образом Отработанный газ через патрубок *8* подается в нижнюю часть корпуса *1* Проходя через сопло *7*, образованное перегородкой *6* и экраном *9*, горячий газ выходит через отверстие *10* в виде струи и поступает в щелевые каналы, образованные дисками *2*, поверхностью вала *4* и корпусом *1*, где передает тепло поверхностям теплообмена В результате теплообмена нагреваются диски *2* и нижняя поверхность вала *4* Тепло передается рабочей жидкости, находящейся внутри вала *4*, которая, испаряясь, переходит в газообразное состояние Газ конденсируется на более холодной внутренней поверхности верхней части вала *4* и внутреннем оребрении *3*, а конденсат стекает в нижнюю часть, т е вал работает как термосифон За счет теплоты конденсации поверхность нагревается, и через диски *2* тепло передается холодному воздуху, подаваемому через патрубок *15* и сопло *14* Нагретый воздух удаляют через патрубок *5* При повороте ротора нагретые части дисков передают тепло холодному воздуху, нагревая его

При вращении дисков часть газа и воздуха увлекается дисками в направлении вращения Струи (сформированные в соплах) обладают большей скоростью и кинетической энергией, чем обычные потоки газа в каналах, и сдувают пограничный слой газа и воздуха, перемещаемый дисками, уменьшая смешение потоков газа и воздуха и интенсифицируя теплообмен с дисками и ротором (ротор обтекается струями с углом обхвата 150-160°)

Кроме того, при истечении из сопел струя увлекает с собой воздух или газ из близлежащего пространства, компенсируя перемещение части газа (или воздуха) дисками из струи Косой срез сопла позволяет изменять направление струи (отклонять ее относительно оси патрубка в зависимости от выбранного соотношения диаметров ротора и диска) и тем самым оптимизировать процесс утилизации тепла При этом достигается разделение струй (смещение их осей под заданным углом), что позволяет практически полностью исключить перемешивание без применения механических средств

Если в газе присутствует большое количество конденсирующейся жидкости, то для срыва и удаления конденсата экран *9* на стороне газа устанавливают с образованием среза сопла в периферийной части патрубка *5* (в нижней части)



В Ярославском государственном техническом университете разработаны принципиально новые схемы аппаратов, в максимальной степени реализующие достоинства сдвоенных теплообменников Они предназначены для охлаждения (нагревания) воды и нагревания (охлаждения) технологической жидкости, их характеризуют тремя буквами (ОВЖ) и дробью, числитель которой показывает расход воды в м^3/ч,

Рис 7 28 Сдвоенный горизонтальный теплообменник для утилизации тепла горячих газов
1 корпус, *2* диски *3* ребра, *4* вал, *5,12* выходные патрубки, *6,13* перегородки *7,14* сопла *8,15* входные патрубки *9,16* экраны *10,11* выходные отверстия

а знаменатель – поверхность трубчатки в $м^2$ Во всех этих аппаратах корпус разделен перегородкой на зону контакта (собственно теплообмена) и зону сепарации (отделения капель от воздуха) Воздух в аппарат эжектируется факелами распыленной воды, капли которой на пути движения к трубчатке охлаждаются до заданной температуры, бомбардируют трубчатку и вновь нагреваются, воспринимая тепло от жидкости в трубках

От других аппаратов, работающих как в режиме самоэжекции, так и в условиях принудительной подачи газа, эти аппараты отличаются тем, что в них вода распыляется центробежно-струйными форсунками При этом обеспечивается равномерное распределение капель по сечению контактной зоны, в результате чего достигаются высокие (до 1000 и более) объемные коэффициенты эжекции Кроме того, трубчатка размещена так, что трубки не экранируют одна другую и все равномерно орошаются прямолетящими каплями, что позволяет существенно повысить эффективность теплообмена как между каплями воды и газом, так и между каплями и жидкостью закрытого контура Описанная схема аппарата является наиболее простой в изготовлении и требует минимальных материальных затрат

В сдвоенных распылительных теплообменниках трубки могут быть размещены вертикально, горизонтально или наклонно Первое решение является наименее удачным, так как капли в этом случае орошают лишь торец трубок, формируют на них стекающую пленку, но какого-либо воздействия на нее не оказывают При значительных углах наклона трубок к горизонту толщина пленки по их длине увеличивается в сторону наклона, а положительное воздействие на нее капель уменьшается Нельзя размещать трубки в несколько рядов один под другим, так как при таком размещении с максимальной эффективностью работает только верхний ряд трубок, в остальном такое устройство ничем не отличается от традиционных оросительных теплообменников со всеми их недостатками

Таким образом, наиболее целесообразно устанавливать трубки горизонтально или под небольшим (до 15°) углом к горизонту так, чтобы все они орошались каплями падающей воды, не перекрывая одна другую Три возможные схемы размещения трубок показаны на рис 7 29 На схеме *а* трубки расположены в зоне контакта, где они наиболее интенсивно бомбардируются каплями При таком размещении трубчатка оказывает существенное сопротивление потоку газа Если же увеличить шаг между трубками, то уменьшится количество воды, попадающей на трубку, что потребует увеличения ее расхода и, следовательно, размеров аппарата, при этом возрастут энергетические и капитальные затраты Эта схема оправданна, когда в аппарате охлаждается небольшое количество оборотной воды, используемой не только для охлаждения в данном аппарате, но и для других технологических нужд (например, для охлаждение обмоток индукционных печей), т е вода подается в охладитель с избытком по отношению к количеству, необходимому для охлаждения технологической жидкости в трубчатке

На второй схеме (рис 7 29*б*) трубки расположены в самом низу зоны контакта В этом случае зона контакта не создает сопротивления потоку газа, но бомбардирующие ее капли имеют здесь значительно меньшую кинетическую энергию Разрешить это противоречие позволяет схема *в*, где трубки располагаются в виде ступенчато установленных секций В плане трубки могут

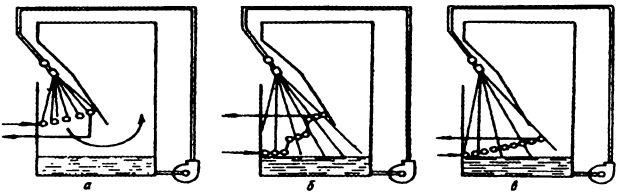


Рис 7 29 Варианты размещения трубчатки в аппаратах типа ОВЖ
а б в зоне контакта, *в* – ниже зоны контакта

перекрывать все сечение контактной зоны (в этом случае орошающая вода максимально участвует в теплообмене), сопротивление же трубок для прохода газа небольшое

Следует отметить, что при работе аппарата в режиме самоэжекции (например, при использовании его в качестве охладителя оборотной воды и технологической жидкости) трубки не должны размешаться выше сечения смачивания (сечения, где периферийные капли факела достигают стенок контактной зоны и ниже которого эжекция газа в факел отсутствует), чтобы не снижать эжекционного эффекта Кроме того, при любой схеме размещения и при значительной поверхности теплообмена трубчатку следует выполнять в виде отдельных однотипных секций, с тем чтобы ремонт аппарата сводился к замене поврежденной секции резервной

Глава 8

Очистка и использование поверхностного стока

8.1. Особенности формирования поверхностного стока

Одним из источников загрязнения природных водных объектов являются поверхностные стоки площадок промышленных предприятий Поэтому при проектировании канализационных систем для промышленных предприятий и узлов должны решаться вопросы охраны водных объектов от загрязнений подобного рода Требования к условиям спуска сточных вод в водные объекты распространяются также и на ливневую канализацию, отводящую атмосферную воду с промышленных площадок, товарно-сырьевых баз и других территорий

По сравнению с хозяйственно-бытовыми и даже городскими сточными водами поверхностный сток с площадок промышленных предприятий имеет, как правило, более сложный состав, поскольку на качество стока существенно влияют культура производства на предприятии, характер технологических процессов, организация складского хозяйства Во многих случаях именно эти факторы определяют состав и концентрации примесей в стоке Так, многолетние наблюдения за качеством поверхностного стока на промышленных площадках химических предприятий Минска, Москвы, Новосибирска, Перми и других городов позволяют сделать вывод о том, что концентрация загрязнений в стоке с промышленных территорий, как правило, гораздо больше, чем в городских сточных водах Средние концентрации взвешенных веществ в ливневых водах с площадок химических производств находятся примерно в тех же пределах, что и в стоке с селитебных территорий. Ниже приведено среднее содержание взвешенных веществ в поверхностном стоке с городских территорий (в г/л)

Участки современной жилой застройки (микрорайоны)	1,4-1,5
Участки недостаточно благоустроенных территорий с преобладанием усадебной застройки	1,8-2,5
Центральные благоустроенные районы с интенсивным движением транспорта и пешеходов (жилые кварталы, зеленые насаждения, участки общественных учреждений, в том числе торговых)	1,7-2,5
Районы с крупными промышленными предприятиями	2,6-3,4
Участки селитебной территории с наличием эродируемых крутосклонов или строительных площадок	4-6

Характерные пределы загрязненности поверхностного стока нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) приведены в табл 8 1

Следует отметить, что карбонатная жесткость поверхностного стока в большинстве случаев значительно меньше, чем подпиточной воды из поверхностных источников воды Поэтому целесообразно после соответст-

вующей очистки от органических загрязнений использовать сток в оборотных системах водоснабжения

Таблица 8 1 Характеристика поверхностных стоков, образующихся на территории НПЗ

Показатели	Талые воды	Ливневые воды	Содержание примесей, мг/л	Талые воды	Ливневые воды
$БПК_{полн}$, мг/л	38-260	29-240	Нефтепродукты	35-1280	10-50
ХПК, мг/л	520-920	255-985	Взвешенные в-ва	310-3800	260-3730
pH	6,9-8,2	7-8,2	Сухой осадок	320-730	300-640
Общая жесткость, мгэкв/л	3,4-6,4	3,6-6,75	Хлориды (Cl^-)	10-90	15-75
Щелочность, мг-экв/л	1,7-3,5	0,9-2,25	Сульфаты (SO_4^{2-})	110-375	50-460

Увеличение концентрации веществ в поверхностном стоке возможно при наличии на водосборных площадках интенсивного тяжелого грузового движения, в том числе железнодорожного транспорта, а также при открытом складировании материалов Для ориентировочных подсчетов можно принимать, что эти воды по количеству грубодисперсных примесей соответствуют городскому поверхностному стоку со строительных площадок (4-6 г/л). Характерной особенностью стока с подавляющего большинства промышленных площадок, а также грузовых железнодорожных станций является повышенное содержание нефтепродуктов Концентрация эфирорастворимых примесей достигает 100-150 мг/л, а на территории автотранспортных участков - 300 мг/л и более. На территории химических производств наиболее загрязненными обычно являются талые и моечные воды Количество органических веществ, попадающих в сток на этих предприятиях, зависит в основном от культуры производства и качества уборки территории Загрязненность поверхностного стока заметно возрастает при открытом хранении и складировании производственного сырья, промежуточных продуктов и отходов производства В сток в значительных количествах попадают органические и токсичные вещества Так, с золоотвалов ТЭЦ дождевыми водами вымываются фенолы, по некоторым данным, содержание летучих фенолов в стоке с золоотвалов составляет от 25 до 45, а нелетучих 250-300 мг/л

Проведенные исследования показывают, что концентрация примесей в поверхностном стоке значительно колеблется На рис 8 1 приведена зависимость изменения концентрации взвешенных веществ в дождевом стоке от времени его поступления на очистные сооружения Из этой зависимости видно, что максимальные загрязнения и расходы этих вод совпадают Однако практически до конца поступления стока в дождеприемные колодцы концентрация примесей остается относительно высокой и в большинстве случаев превышает концентрации, допустимые для сброса в водные объекты

Биохимическая потребность в кислороде (БПК) колеблется в широком диапазоне в зависимости от подотраслевой принадлежности объекта Для

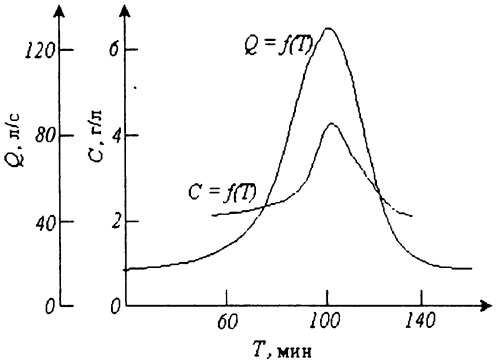


Рис 8 1 Изменение расхода (Q) и концентрации взвешенных веществ (C) в дождевом стоке от времени притока дождевых вод (T)

стока большинства химических предприятий значения БПК мало отличаются от БПК городского стока В зависимости от степени благоустройства и качества уборки территории среднее содержание органических веществ по $БПК_5$ может составлять от 40-50 до 100-150 мг/л При наличии на водосборе зеленых насаждений на открытых грунтовых поверхностях следует принимать бóльшие значения загрязненности Если газоны отсутствуют или их доля по отношению ко всей площадке несущественна (при условии качественной и регулярной уборки площадки), то загрязненность стока будет минимальной Увеличению БПК способствуют различные технологические выбросы отработанных газов в атмосферу и, в частности, выбросы ТЭЦ, так как на кровле цехов и покрытиях оседают продукты неполного сгорания топлива

Таким образом, можно сделать вывод, что поверхностные сточные воды с территорий промышленных предприятий в подавляющем большинстве требуют локальной очистки перед сбросом их в ливневую канализацию населенных мест, в водные объекты или в систему технического водообеспечения

В исследованиях отечественных и зарубежных ученых установлена высокая степень бактериальной обсемененности поверхностного стока По числу бактерий кишечной группы в единице объема отдельные пробы дождевых и талых вод соответствуют бытовым сточным водам, в среднем же этот показатель в поверхностном стоке в 10-100 раз ниже, чем в бытовом Бóльшая часть бактерий содержится в твердой фазе стока Это свидетельствует о том, что поверхностный сток и осадок, образующийся при его отстаивании, опасны в санитарно-эпидемиологическом отношении

Талый сток более загрязнен носителями кишечных инфекций, в дождевом стоке максимальное количество микроорганизмов содержится в летний период в дневное время. Наиболее неблагополучными по бактериальной зараженности являются территории неблагоустроенные, в том числе пониженные участки населенных мест, периодически подвергающихся затоплению дождевыми и талыми водами Источником загрязнения стока микроорганизмами является, в частности, и загрязненный грунт Судя по анализам, состав микрофлоры в стоках атмосферных вод такой же, как в среднезагрязненной почве

До недавнего времени влияние поверхностных сточных вод с застроенных территорий на качество поверхностных водоисточников практически

не учитывалось Выпуск поверхностного стока запрещался лишь в участки водоемов, специально отведенные для купания Наблюдения последних лет показали, что атмосферные воды, стекающие из населенных мест и с промышленных площадок, являются основным источником загрязнения водных объектов Часто даже при полной биологической очистке всех производственных и бытовых сточных вод загрязненность некоторых водоисточников продолжает нарастать, что обусловлено в основном сбросом в них поверхностного стока.

При залповых сбросах большого количества грубодисперсных примесей, что обычно наблюдается при выпадении дождей, происходит частичное осаждение этих примесей в створе ливневыпуска и ниже по течению Это способствует постепенному заиливанию водоема, препятствует нормальному протеканию биологических процессов на дне водоприемника Как известно, не допускается сброс со сточными водами частиц с гидравлической скоростью осаждения более 0,4 мм/с для проточных водоемов и 0,2 мм/с – для непроточных В поверхностном стоке содержание твердых примесей с такой гидравлической скоростью осаждения достигает30-40% Приблизительно четвертая часть осадка из поверхностного стока – органического происхождения Попадая в водоем, эта часть донных наносов окисляется кислородом, растворенным в воде В толще наносов происходят анаэробные процессы разложения (гниения) органических веществ, сопровождающиеся выделением газов (метан, сероводород)

Схему воздействия поверхностного стока на качественное состояние воды в водоеме упрощенно можно представить следующим образом Твердые частицы, поступающие в водоем, частично выносятся потоком воды, увеличивая при этом ее мутность в створе выпуска и ниже по течению. Некоторое количество взвешенных веществ оседает у ливневыпуска, образуя донные отложения. Органические вещества, находящиеся в атмосферных водах в растворенном состоянии и в виде коллоидов, попадая в водоем, сносятся по течению и в процессе смешения с водой водотока потребляют растворенный кислород В водоеме создается некоторый дефицит кислорода, постепенно уменьшающийся при прекращении поступления стока

Всплывающие на поверхность пузырьки газов, образующихся при анаэробном разложении органических веществ донных отложений, ухудшают органолептические свойства воды Вода приобретает неприятные запахи и привкус Вместе с пузырьками газа на поверхность выносятся частицы наносов, что увеличивает мутность воды водоемов

Поверхностным стоком с застроенных территорий смывается значительное количество плавающих веществ (обрывки бумаг, окурки, мусор, листья, нефтепродукты и др), которые также ухудшают органолептические свойства воды и портят внешний вид водоисточников Нефтепродукты, поступающие с поверхностными сточными водами, могут существенно влиять на кислородный режим водоемов. Во-первых, на их окисление расходуется растворенный в воде кислород и, во-вторых, образующаяся на поверхности водоемов нефтяная пленка в значительной степени препятствует процессу аэрации водных объектов

Для резкого уменьшения выноса в водные объекты загрязняющих веществ с поверхностным стоком на предприятиях должны быть предусмотрены следующие первоочередные мероприятия

– исключение сброса в дождевую канализацию отходов производства,

– регулярная уборка территории,

– своевременный ремонт дорожных покрытий,

– ограждение зон озеленения бордюрами, исключающими смыв грунта во время ливневых дождей на дорожные покрытия,

– обеспечение эффективной работы пыле- и газоочистных установок с тем, чтобы надежно очищать выбросы, поступающие в атмосферу, и предотвращать появление в поверхностном стоке, формирующемся на территории предприятия, специфических загрязнителей,

– повышение технического уровня эксплуатации железнодорожного и автомобильного транспорта,

– ограждение строительных площадок с упорядочением отвода поверхностного стока по временной системе открытых каналов, осветлением его на 50-70 % в земляных отстойниках и последующим отведением в дождевую канализацию,

– локализация участков территории, где неизбежны потеря и утечка сырья и промежуточных продуктов, с отведением поверхностного стока в систему производственной канализации для совместной очистки,

– упорядочение складирования и транспортирования сыпучих и жидких металлов

При проектировании систем дождевой канализации промышленных предприятий следует в обязательном порядке рассматривать возможность использования поверхностного стока в системах технического водоснабжения

8.2. Отведение и очистка поверхностного стока

Отведение поверхностного стока с территории промышленных предприятий в водные объекты должно допускаться в тех случаях, когда использование стока в системах производственного водоснабжения оказывается технически невозможным или экономически нецелесообразным Поверхностный сток должен отводиться в соответствии с действующими нормативами и требованиями, а также с учетом особенностей его химического состава и условий формирования Места выпуска поверхностных стоков в водный объект должны согласовываться с органами, регулирующими использование и охрану вод, с санитарно-эпидемиологической службой и рыбнадзором

При проектировании выпусков очищенных, поверхностных вод в рыбохозяйственные водоемы место сброса должно выбираться с учетом рыбохозяйственного значения данного участка водоема в соответствии с ГОСТ 17 12 04—77 «Охрана природы Гидросфера Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных объектов» и с учетом требований, изложенных в разделе III «Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами (нормативы качества воды водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей)» При самостоятельном отве-

дении стока по сети дождевой канализации и отсутствии в нем специфических примесей можно ограничиться очисткой основного количества годового объема стока (не менее 70%), при этом на очистку следует подавать наиболее концентрированную часть стока Эти условия должны соблюдаться при расчете очистных сооружений для стока от малоинтенсивных, часто повторяющихся дождей (с периодом однократного превышения расчетной интенсивности 0,05-0,1 года) или на аккумуляцию и последующую очистку стока от осадков с высотой слоя 10-15 мм

Приведенные расчетные значения интенсивности и слоя осадков в каждом конкретном случае могут быть уточнены на основе обработки данных за многолетний период

Степень очистки стока, не содержащего специфических примесей, устанавливают, исходя из условия предотвращения заиливания и засорения водного объекта и исключения возможности нарушения нормативного содержания в воде растворенного кислорода Перед выпуском в водный объект поверхностный сток во всех случаях должен быть очищен от плавающих примесей, в том числе нефтепродуктов и песка В случае поступления в дождевую канализацию производственных сточных вод к выпуску стока в водный объект предъявляют такие же требования, как и к выпуску производственных сточных вод Степень очистки поверхностного стока определяют исходя из того, что в расчетном (контрольном) створе водоприемника (с учетом разбавления и самоочищения) соблюдаются нормативы на качество воды водных объектов, используемых для хозяйственно-питьевых, культурно-бытовых нужд населения и рыбохозяйственных целей Очистные сооружения, как правило, должны быть рассчитаны на прием всего объема сточных вод, поступающих по сети дождевой канализации

При определении условий смешения с водой водного объекта расчетный расход поверхностного стока ($Q_р$) принимают равным установленному расходу стока после очистных сооружений, а в отсутствие регулирования стока рассчитывают по формуле (в $м^3/с$)

$$Q_р = 2{,}8 \cdot 10^{-5} h_{см} F \psi_д / (T_д + t),$$

где F – площадь бассейна водосбора, га, $\psi_д$ – общий коэффициент дождевых вод (принимается в пределах 0,5-0,7), $h_{см}$ – среднесуточный максимум атмосферных осадков, мм, $T_д$ – средняя продолжительность дождя в данной местности, ч (приведена в табл 8 2), t – время прохождения стоком от крайней точки водосборного бассейна до места выпуска в водный объект, ч

Поскольку для большинства районов страны, особенно южных, $T_д$ характеризует расход дождевых и талых вод, а поливомоечные воды составляют только малую часть их количества, последними при расчетах во многих случаях можно пренебречь

Условия отведения поверхностного стока в водные объекты можно рассчитать в соответствии с «Методическими указаниями по применению Правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами»

При большом числе выпусков дождевой канализации в пределах городской территории или производственно-территориального комплекса требуемая степень очистки поверхностного стока и допустимое к сбросу количество примесей промышленных предприятий должны определяться

соответствующими научно-исследовательскими и проектными организациями с учетом оптимального распределения затрат на очистку При разработке проектов отведения поверхностного стока с территории предприятий химического профиля ориентируются на следующие конкретные условия размеры, конфигурация и рельеф водосборного бассейна, источники загрязнения территории, наличие свободных площадей для строительства очистных сооружений и т.д. При этом учитывают·

– необходимость локализации отдельных участков производственной территории с отводом стока в производственную канализацию или после предварительной очистки - в дождевую;

– целесообразность раздельного отведения стока с водосборных площадей, различающихся характером и интенсивностью загрязнения территории,

– целесообразность частичного или полного использования поверхностного стока для промышленного водоснабжения,

– возможность и целесообразность подачи поверхностного стока на очистные сооружения предприятий промышленного узла или города для совместной очистки со сточными водами

Таблица 8 2 Средняя продолжительность дождей ($T_д$) в день в ряде городов

Пункт	$T_д$, ч	Пункт	$T_д$,	Пункт	$T_д$, ч
Астрахань	4	Владикавказ	8	Нарьян-Мар	8
Архангельск	9	Грозный	8	Оренбург	6
Адлер	7	Гагра	8	Одесса	5
Андижан	6	Гюмри	4	Омск	6
Алматы	6	Днепропетровск	5	Пермь	9
Алдан	9	Донецк	5	Псков	6
Анадырь	8	Златоуст	10	Ржев	6
Александровское	9	Закаталы	9	Рига	6
Брянск	6	Котлас	10	Санкт-Петербург	6
Бугульма	8	Кривой рог	5	Среднеколымск	9
Батуми	9	Курск	6	Салехард	9
Барнаул	6	Калининград	6	Тбилиси	8
Баргузин	6	Кемь	6	Туруханск	13
Биробиджан	9	Киров	8	Томск	8
Благовещенск	6	Кишинев	5	Тюмень	7
Бикин	6	Кумайри	4	Улан-Удэ	5
Волгоград	5	Львов	7	Уэлен	7
Витебск	6	Ленкорань	9	Чита	5
Вильнюс	6	Москва	6	Шмидта мыс	10
Владивосток	8	Минск	5	Якутск	4

В схемах отведения следует по возможности предусматривать самотечную подачу стока на очистные сооружения. Степень очистки поверхностного стока в зависимости от схемы его отведения определяется требованиями к качеству воды, используемой для производственных целей, или условиями спуска в водные объекты, используемые для хозяйственно-

питьевых и культурно-бытовых нужд населения и в рыбохозяйственных целях

Для поверхностных стоков с территории промышленных предприятий, не содержащих токсичных примесей, можно предусматривать самостоятельные очистные сооружения, можно также отводить стоки на городские или заводские очистные сооружения для очистки их вместе с бытовыми или производственными сточными водами

Поверхностные стоки с территорий промышленных предприятий, содержащие специфические примеси с токсическими свойствами, очищают, как правило, совместно с производственными или промышленно-бытовыми сточными водами В качестве примера на рис 8 2 приведена технологическая схема обезвреживания сточных вод завода химреактивов и поверхностного стока с его территории

Сточные воды заводов содержат разнообразные органические и минеральные примеси (ХПК колеблется в пределах 1000-7000 мг/л,$БПК_{полн}$ – в пределах 650-1000 мг/л, сухой остаток 3000-10000 мг/л, сульфаты 2000-6000 мг/л, взвешенные вещества 200-300 мг/л). Поверхностный сток формируется на территории завода и по составу примесей не отличается существенно от производственных сточных вод, однако заметно отличается по их содержанию Так, взвешенных веществ в стоке в 5-10 раз больше, а

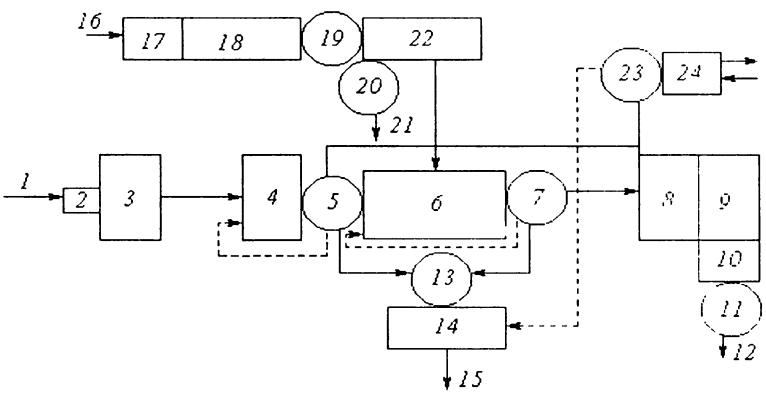


Рис 8 2 Технологическая схема обезвреживания сточных вод и поверхностного стока с территории завода химреактивов

1 – трубопровод для отведения производственных сточных вод, *2* – блок предварительной очистки производственных сточных вод, *3* – усреднитель производственных сточных вод, *4* – аэротенк первой ступени с регенератором, *5* – вторичный отстойник первой ступени, *6* – аэротенк второй ступени, *7* -вторичный отстойник второй ступени, *8* – микрофильтры, *9* – песчаные аэрируемые фильтры, *10* – хлораторная, *11* – контактные резервуары, *12* – трубопровод для отведения очищенной жидкости, *13* – илоуплотнитель избыточного активного ила, *14* – вакуум-фильтры, *15* - отвод осадка на термосушку, *16* – ливневый коллектор, *17* – решетки, *18* – регулирующий резервуар, *19* – насосная станция для перекачки поверхностного стока, *20* – насосная станция для перекачки осадка стока *21* – отвод осадка на иловые площадки, *22* – аккумулирующая емкость, *23* – первичные отстойники, *24* – песколовка

органических веществ примерно во столько же раз меньше, чем в производственных сточных водах

Технологическая схема очистки (рис 8 2) включает в себя пять блоков 1) блок механической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод,
2) блок предварительной очистки производственных сточных вод, состоящий из нейтрализатора и усреднителя с барботажем для смешивания производственных сточных вод, выравнивания концентрации примесей и частичной очистки, 3) блок биологической очистки, включающий в себя аэротенки первой ступени *4* с адаптированной микрофлорой для очистки производственных сточных вод, аэротенки второй ступени *6* для очистки смеси сточных вод и поверхностного стока и отстойники после аэротенков,4) блок доочистки, включающий в себя микрофильтры *8* и аэрируемые песчаные фильтры *9*,5) блок обработки осадка *13*

Поверхностный сток перед подачей на биологическую очистку регулируется для выравнивания расхода и подвергается механической очистке, а в аэротенк второй ступени биологической очистки подаются хозяйственно-бытовые сточные воды прилегающего жилого массива для увеличения степени разбавления производственных сточных вод Сброс в сеть производственной канализации концентрированных маточников и переработка их на локальных установках исключены

Результаты санитарного анализа технологических сточных вод завода химических реактивов, поступающих на биологические очистные сооружения и прошедших очистку, приведены в табл 8 3 С учетом данных этой таблицы институтом «Гипрохимреактив» было выполнено проектирование сооружений для очистки сточных вод ряда заводов химреактивов по описанной комплексной технологической схеме

Самостоятельная очистка дождевого стока ограничивается из-за значительных затрат и трудностей, связанных с периодической эксплуатацией сооружений, предназначенных для удаления из стока специфических примесей Поэтому при отведении на очистку поверхностного стока с территории предприятий предварительное разделение стока не допускается, так как необходима очистка всего стока В таких случаях для уменьшения требуемой мощности очистных сооружений, как правило, следует предусматривать регулирование расхода стока При этом размер регулирующей емкости принимают из условия минимальных общих затрат на обезвреживание стока

Дождевой сток перед очистными сооружениями можно разделять несколькими способами (рис 8 3) Первый способ (рис 8 3*а*) предусматривает регулирование расхода стока, обеспечиваемое устройством на коллекторах дождевой канализации разделительных камер В этом случае на очистку направляют сток от малоинтенсивных дождей и часть стока с определенным расходом от интенсивных дождей, а остальную часть сбрасывают без очистки Второй способ разделения (рис 8 3*б*) заключается в аккумулировании и последующем отведении на очистку объема дождевых вод, притекающих от начала стока до какого-то определенного времени При таком разделении на очистку направляют концентрированную часть стока от всех дождей

При любой схеме разделения дождевого стока состав и свойства воды водных объектов после сброса очищенных и неочищенных стоков должны отвечать нормативам и соответствующим правилам

Таблица 8 3 Результаты анализа сточных вод завода химических реактивов

Показатели	Производственные сточные воды		Смеси хозяйственно-бытоых, производ-ственных сточных вод и поверхностго стока после очистки
	от действующих производств	после выделения маточников, нейтразации, усреднения, аэрации	
pH	2-9	6-9	8,5
$БПК_{полн}$, мг O_2/л	650-4000	1220	3,0
ХПК, мг O_2/л	1000-7000	1650	50,0
Взвешенные вещества, мг/л	200-300	200	5,0
Растворенный кислород, мг/л	Отсутствует	0,7	8,0
Ароматические углеводороды (толуол) , мг/л	21-300	26	0,2
Ацетон, мг/л	3,5-10	5,2	0,02
Сухой остаток, мг/л	3000-10000	5000	500
Сульфаты, мг/л	2000-6000	2200	120
Хлориды, мг/л	300-1400	150	80
Азот аммонийний, мг/л	5-20	17	0,1
Азот нитритов, мг/л	Не обнаружен		0,015
Азот нитратов, мг/л	Не обнаружен		9,0
Фосфор, мг/л	1,0-3,0	2,5	0,25

Для регулирования расхода поверхностного стока без сброса части его непосредственно в водоприемники следует предусматривать регулирующие емкости, рассчитанные на прием пиковых расходов стока и последующее опорожнение после уменьшения или прекращения притока (см рис 8 3*в*), или аккумулирующие емкости, рассчитанные на регулирование стока в течение определенного периода (года, теплового периода, месяца)

При регулировании расхода стока (см рис 8 3*а,в*) для последующей предварительной или окончательной самостоятельной его очистки можно применять отстойные сооружения или флотационные установки Высокий эффект механической очистки на этих сооружениях достигается при предварительной реагентной обработке стока Такая обработка возможна лишь при условии автоматизации процесса очистки, что обусловлено эпизодичностью поступления стока, и наиболее целесообразна при совместной его очистке с производственными сточными водами

При разделении стока частичным аккумулированием (см рис 8 3*б*) очистка от основной массы примесей предусмотрена в самой аккумулирующей емкости

Для дополнительного осветления предварительно отстоявшийся поверхностный сток в случае необходимости можно обработать коагулянтами с последующим отстаиванием, подвергнуть фильтрованию через различные загрузки из природных и синтетических материалов (кварцевый песок, керамзит, пенополистирол, пенополиуретан, торф), либо флотации

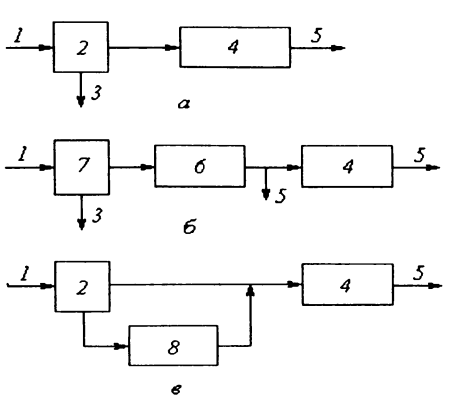


Рис 8 3 Принципиальные схемы разделения дождевого стока перед очистными сооружениями
1 – коллектор дождевой канализации, *2* – разделительная камера, *3* – сброс неочищенного поверхностного стока в водный объект, *4* – очистные сооружения, *5* – отведение очищенного поверхностного стока в водный объект или в систему производственного водоснабжения, *6* – аккумулирующая емкость, *7* – камера распределения стока, *8* – регулирующая емкость Остальные пояснения в тексте

с предварительной реагентной обработкой стока (в последнем случае поверхностный сток перед сбросом в водный объект рыбохозяйственного назначения не должен содержать остаточных концентраций коагулянтов)

Чтобы снизить содержание растворенных органических примесей, целесообразно в соответствующих случаях направлять поверхностный сток на заводские сооружения биологической очистки Если поверхностный сток предприятия характеризуется не только химическим, но и микробным загрязнением, необходимо предусматривать сооружения для обеззараживания стоков и периодически контролировать степень их очистки В этих случаях параметры хлорирования рекомендуется принимать такими же, как при обеззараживании биологически очищенных сточных вод

Степень очистки поверхностного стока, в зависимости от принятой схемы отведения, определяется требованиями к качеству воды, используемой в технологических процессах, или условиями спуска воды в водоемы Качество воды, предназначенной для производственных нужд, устанавливают в каждом конкретном случае в соответствии с требованиями технологического процесса Очищенные поверхностные стоки можно успешно использовать в оборотных системах охлаждающего водоснабжения Как показывают расчеты, поверхностного стока бывает недостаточно для восполнения потерь воды в оборотных системах, поэтому его можно смешивать с речной водой или очищенными сточными водами На предприятиях нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и некоторых других отраслей промышленности, размещенных в климатических зонах со средним количеством осадков 400-600 мм/год, поверхностный сток составляет 10-30% годового потребления воды Исходя из этих цифр и определяют степень очистки поверхностных вод Содержание органических и растворенных минеральных веществ в осветленном поверхностном стоке, как правило, не превышает норм, установленных к добавочной воде

Важнейшими факторами, определяющими экономическую эффективность использования поверхностного стока в оборотных системах водяного охлаждения, являются его термостабильность и коррозионная агрес-

сивность Технологические свойства поверхностного стока предприятий химической промышленности оценивают по индексу насыщения воды карбонатом кальция ($I_н$), индексу стабильности ($I_с$) (табл 8 4) Из приведенных аналитических данных следует, что поверхностный сток относительно нестабилен Специальные испытания термостабильности и коррозионной агрессивности дождевых вод завода резинотехнических изделий проведены на экспериментальной установке, моделирующей работу натурной системы оборотного водоснабжения Поверхностный сток характеризовался следующими показателями ХПК 40 мг/л, жесткость общая 5,49 мг-экв/л, общее солесодержание 900 мг/л, щелочность 3,9 мг-экв/л, pH 7,6, содержание (мг/л) кальция 69,4, магния 24, хлоридов 211, сульфатов 103 Экспериментальные исследования проводили при температуре оборотной воды до 30 и 40 °С с коэффициентами упаривания до 3,5

Таблица 8 4 Оценка технологических свойств поверхностного стока химических предприятий при различных температурах

Предприятие	30 °С		35 °С		40 °С	
	$I_н$	$I_с$	$I_н$	$I_с$	$I_н$	$I_с$
Завод резинотехнических изделий	0,1	7,4	0,2	7,21	0,29	7,02
Нефтеперерабатывающий завод	0,37	7,06	0,47	6 87	0,56	6,68
Нефтехимический комбинат	0,11	7,28	0,21	7,09	0,3	6,9
ПО «Азот»	– 0,48	7,96	– 0,38	7,77	– 0,29	7,58
Завод синтетического каучука	– 0,15	8,27	– 0,05	8,08	0,04	7,89

Низкая термостабильность вод обусловливает применение специальной стабилизационной обработки Эффективным методом считается подкисление стока раствором с содержанием кислоты 100-150 мг/л (доведение карбонатной жесткости добавочной водой до 1-2 мг-экв/л)

Коррозионные испытания оборотной воды проводили при коэффициенте упаривания 2, температуре 20 °С и скорости движения 0,5 м/с Исследования показали, что поверхностный сток не является коррозионно-агрессивным по отношению к углеродистой стали Подкисление добавочной воды не вызывает усиления коррозии

В зависимости от принятой схемы отведения для очистки поверхностного стока можно применять песколовки, отстойные сооружения различных типов и сооружения для доочистки Схема очистных сооружений может быть предназначена как для окончательной очистки поверхностного стока, так и для предварительной с последующей доочисткой на станциях водоподготовки или очистки сточных вод (рис 8 4)

Для удаления из поверхностного стока основной массы взвешенных веществ и нефтепродуктов предусматривают отстойники, нефтеловушки, пруды, аккумулирующие емкости, накопители и др Сооружения могут быть железобетонными или земляными Железобетонные отстойники це-

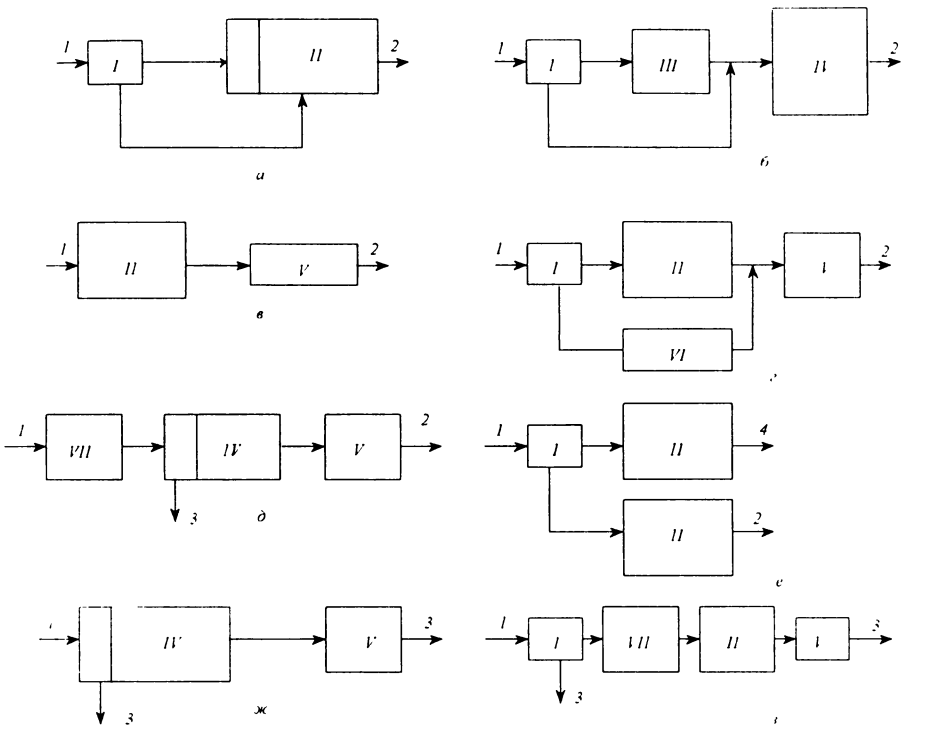


Рис 8 4 **Принципиальные схемы (*а – з*) сооружений для очистки поверхностного стока с территорий промышленных предприятий**

I разделительная камера, *II* – пруд-отстойник, *III* – отстойник, *IV* аккумулирующая емкость *V* сооружения доочистки, *VI* – регулирующая емкость, *VII* – песколовка, *1* – поверхностный сток, *2* – очищенный поверхностный сток в систему производственного водоснабжения или на станцию водоподготовки, *3* поверхностный сток в водоем, *4* – поверхностный сток на станцию очистки сточных вод

лесообразны при расходе сточных вод до 500 л/с, а также при неблагоприятных гидрогеологических условиях В железобетонных отстойниках с механизированным удалением задержанных загрязнений следует предусматривать песколовки отделение песка и других грубых примесей способствует работе последующих сооружений и упрощает их эксплуатацию

При расходе до 300 л/с рекомендуются отстойники закрытого типа, т е подземные железобетонные сооружения При бо́льших расходах воды более экономичны пруды-отстойники, для устройства которых можно использовать естественные понижения местности, овраги, карьеры, русла пересыхающих ручьев и т д , в этом случае рекомендуется предусматривать камеры для удаления крупных примесей

Отстойные сооружения рассчитывают по продолжительности пребывания в них жидкости или по гидравлической крупности частиц, выделение которых обеспечивает требуемый эффект очистки

Исследования показывают, что поверхностные стоки в значительной степени содержат мелкодисперсные примеси Так, при выделении взвешенных частиц с гидравлической скоростью осаждения 0,2 мм/с и более остаточная концентрация веществ составляет 100-500 мг/л При продолжительности отстаивания 1-2 сут снижение содержания взвешенных веществ и показателя ХПК колеблется от 80 до 90%, а показателя $БПК_{20}$ от 60 до 80% Остаточное содержание взвешенных веществ в отстойной воде может достигать 50-100 мг/л, нефтепродуктов 0,5-3 мг/л, а органических веществ в пересчете на ХПК и $БПК_{20}$ соответственно 50-80 и 15-20 мг/л Для снижения содержания растворенных органических примесей поверхностный сток после отстаивания и регулирования подвергают биологической очистке совместно с производственными или городскими сточными водами

Наибольшее распространение для доочистки поверхностного стока получило фильтрование Прошли длительную промышленную проверку фильтры с загрузкой из песка, керамзита, пенополиуретана, пенополистирола, сипрона, древесной стружки Наиболее производительными являются пенополиуретановые и пенополистирольные фильтры При скорости фильтрования 10-30 м/ч эффект осветления на этих фильтрах без реагентной обработки составляет 60-90% Применение флоккулянта (1-2 мг/л) позволяет увеличить скорость фильтрования до 30-40 м/ч с сохранением эффекта осветления Грязеемкость этих загрузок составляет 40-50 кг/м^3

На очистных станциях с небольшой пропускной способностью широко практикуется доочистка на кассетных фильтрах с загрузкой из древесной стружки. Регенерацию загрузки таких фильтров не предусматривают По мере забивания фильтров кассеты вынимают и загружают новой стружкой Для повышения грязеемкости фильтров устраивают многослойную загрузку, в частности, для этой цели используют кокс, керамзит и стружку различных размеров из разных пород деревьев Отдельные слои загрузки разделяют мешковиной

На ряде предприятий для доочистки поверхностного стока или для его совмещения с производственными сточными водами широко применяют песчаные фильтры

Схема станции доочистки сточных вод фильтрованием представлена на рис 8 5

Сооружения: приемные резервуары *1* с насосной станцией *2*, обеспечивающие подачу биохимически очищенной сточной воды на доочистку, барабанные сетки *3*, служащие в основном для предохранения фильтров от попадания в них крупных примесей, волокнистых и прочих плавающих частиц (попутно барабанные сетки могут задерживать также некоторую часть активного ила), фильтровальные сооружения *4*, являющиеся основным элементом станций доочистки, контактный резервуар *5* для обеспечения эффективности обеззараживания воды хлором, быстроток-аэратор *6*, служащий для насыщения воды кислородом и удаления избыточного хлора, резервуар *7* для сбора промывных вод с насосной станцией *8* для их перекачки в головные сооружения, резервуар *9* – накопитель воды для промывки фильтров с насосной станцией *10* для подачи воды на промывку фильтров

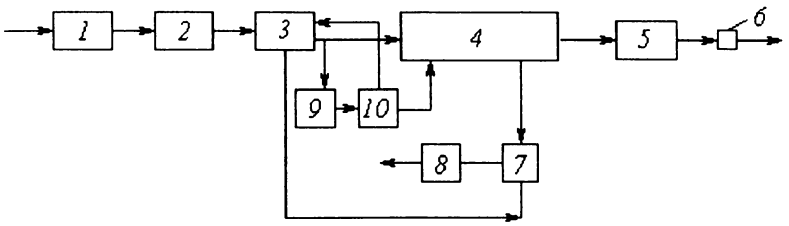


Рис 8 5 Схема станции доочистки сточных вод фильтрованием

1 5 7 9 резервуары, *2, 8, 10* насосные станции, *3* барабанные сетки, *4* фильтры, *6* аэратор

В отдельных случаях эта схема может быть видоизменена При необходимости реагентной обработки воды предусматривают реагентное хозяйство (склад для хранения, устройства для приготовления и дозирования растворов реагентов) При благоприятном рельефе местности можно обойтись без насосной станции для подачи воды на доочистку При подкачке воды на высоту до 5-6 м желательно установить шнековые насосы, в этом случае приемные резервуары не нужны Если вода используется для производственных целей, может не потребоваться быстроток-аэратор, однако могут оказаться необходимыми дополнительная емкость и насосная станция

В зависимости от качества очищаемой сточной воды ее хлорирование может производиться до или после фильтровальных сооружений Если обработка сточных вод хлором не ухудшает их фильтрационные свойства, то целесообразно хлорирование воды до фильтрования Это позволяет уменьшить обрастание трубопроводов, улучшить санитарное состояние фильтровальной загрузки и обойтись без контактного резервуара Чтобы предотвратить коррозионное разрушение отдельных элементов барабанных сеток, предварительное хлорирование следует проводить после прохождения воды через них

Таким образом, выбор схемы станции и оборудование для доочистки сточных вод во многом определяется местными условиями

При расчете вместимости приемных резервуаров необходимо учитывать возможность неравномерного притока воды со станции аэрации и изменения режима работы фильтровальных сооружений Допустимая перегрузка может быть принята до 15% при постепенном наращивании скорости фильтрации Если фильтры промываются водой, прошедшей барабанные сетки, то неравномерность притока воды со станции аэрации можно также уменьшить, наполнив резервуары-накопители воды в часы максимального притока Вместимость резервуаров-накопителей воды для промывки и сборных резервуаров промывных вод рассчитывают, исходя из двукратного объема промывной воды При этом резервуары для сбора промывных вод должны быть рассчитаны также на прием воды от промывки барабанных сеток и сброса первого фильтра

На рис 8 6 представлена схема очистных сооружений завода резинотехнических изделий

Формирующийся на территории завода поверхностный сток поступает в отстойник-усреднитель *I* После усреднения и отстаивания сточные воды насосом перекачиваются на песчаные фильтры *II*. Фильтры промываются отфильтрованной водой *3*, которая после промывки направляется в шламонакопитель *V* для отстаивания Задержанный в отстойнике-усреднителе и шламонакопителе осадок перекачивается в уплотнитель *VI* циклонного типа Отстоенная в шламонакопителе и уплотнителе вода отводится в отстойник-усреднитель *I* Очистные сооружения полностью автоматизированы По мере поступления дождевых стоков в отстойник-усреднитель и достижения заданного уровня жидкости включаются в работу насосы *IV*, подающие воду на фильтры *II* Промывка фильтров осуществляется автоматически в зависимости от потери напора в них

Длительная эксплуатация очистных сооружений на ряде предприятий, выпускающих резинотехнические изделия, показала их надежность и высокую степень очистки поверхностного стока Средние концентрации нефтепродуктов в стоке, поступающем на фильтры, колеблются в пределах 5 10 мг/л, а в отфильтрованной воде не превышают 2 мг/л Взвешенных веществ содержится соответственно 20-30 и 3-5 мг/л Фильтр загружают песком фракций 1,2-2 мм При скорости фильтрования 7-10 м/ч продолжительность цикла фильтрации составляет в среднем 72 ч

На предприятиях нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслей промышленности накоплен опыт использования поверхностного стока в системах промышленного водоснабжения На большинстве НПЗ поверхностный сток с территорий технологических установок, резервуарных парков и эстакад отводится вместе с производственными сточными водами После соответствующей очистки эти воды, как правило, используют для подпитки оборотных систем Возврат производственно-дождевых сточных вод осуществляется на Новополоцком, Уфимском, Киришском и Краснодарском НПЗ В большинстве случаев поверхностный сток с остальной территории заводов отводится открытыми лотками и кю-

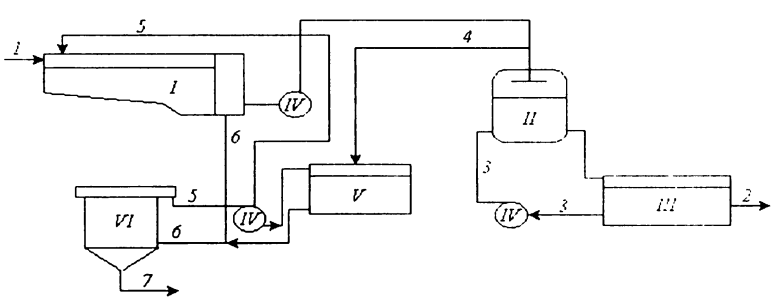


Рис 8.6 Принципиальная технологическая схема очистки производственно-дождевых сточных вод завода резинотехнических изделий

I – отстойник-усреднитель, *II* – напорный песчаный фильтр, *III* – резервуар чистой воды, *IV* – насосы, *V* – резервуар промывной воды, *VI* – уплотнитель осадка, *1* – поступающие сточные воды, *2* – очищенные сточные воды, *3* – вода для промывки фильтров, *4* – грязные промывные воды, *5* – вода от осадка, *6* – влажный осадок, *7* – уплотненный осадок на вывоз

ветами Проведенные БашНИИНП (Башкортостан) исследования показали, что по солевому составу поверхностный сток соответствует требованиям, предъявляемым к добавочной воде, и может быть использован после отстаивания для подпитки оборотных систем. По карбонатной жесткости (в среднем 0,7-1,2 мг-экв/л) поверхностный сток НПЗ сопоставим с водой, умягченной известково-содовым способом Использование поверхностного стока резко уменьшает накипеобразование в холодильно-конденсационной аппаратуре, но снижается коррозионная стойкость, что требует применения эффективной защиты.

На ряде зарубежных нефтехимических заводов поверхностный сток используют в оборотных системах и для пожаротушения. При этом очистка его ограничивается, как правило, отстаиванием в прудах Один из самых совершенных в настоящее время НПЗ топливного профиля расположен в г. Грандпун в 57 км от Парижа Основная продукция завода – бензин, дизельное топливо, мазут и битум Завод, перерабатывающий 5,1 млн тонн нефти в год, полностью обеспечивает свою потребность в технической воде за счет поверхностного стока Для максимального задержания атмосферных осадков по периметру всего завода, площадь которого 200 га, сооружен железобетонный ров, достигающий водонепроницаемых пластов Задержанные дождевые воды дренажными насосами перекачиваются в резервуар и используются затем в системах промышленного водоснабжения

На химических предприятиях широкое распространение получило отведение продувочных вод оборотных систем в дождевую канализацию, что приводит к значительному возрастанию солесодержания в этом стоке. Для использования такого стока в оборотных системах требуется его очистка, а также умягчение или обессоливание. Проекты использования поверхностного стока совместно с продувочной водой оборотных систем на базе кондиционирования вод с применением различных физико-химических методов в последние годы разработаны для ряда предприятий химической промышленности.

Технико-экономические расчеты, проведенные для предприятий различных отраслей промышленности, показывают, что подготовить поверхностный сток для использования в системах промышленного водоснабжения значительно проще и экономичнее, чем обеспечить нормативные требования для спуска его в водные объекты.

Глава 9

Контроль загрязнения водной среды сточными водами

9.1. Оценка состояния контролируемой среды

На процессы формирования качества водной среды влияют факторы, связанные с деятельностью человека и с изменениями природных условий В связи с большим количеством объективных факторов эти процессы носят случайный характер, поэтому состояние контролируемого объекта оценивают не по отдельным результатам измерений концентраций примесей, а по усредненному содержанию этих примесей за определенное время T, т е оценка контролируемого параметра $x_p(t)$, $p = 1, ., m$ должна осуществляться не по отдельным дискретным значениям случайной функции $x_p(t)$, а по ее интегральному значению

$$\bar{x}_p(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T_2}^{t+T_2} x_p(t)dt, \qquad p = 1, \quad ,m. \tag{9 1}$$

Здесь m – содержание примесей, концентрация которых контролируется Выражение (9 1) является оценкой тренда (отклонения) случайного процесса по заданной единственной реализации $x_p(t)$

Существует множество методов выделения тренда нестационарных случайных процессов по измеренным дискретным значениям Сложность разработки этих методов и их точность находятся в противоречии с универсальностью и простотой их реализации Метод выделения тренда нестационарного процесса загрязнения для оптимальной оценки состояния окружающей среды с помощью автоматизированных систем контроля должен обладать универсальностью и простотой в реализации при обеспечении приемлемой точности Требование универсальности метода – это естественное требование к серийно выпускаемым изделиям, а требование простоты в реализации обусловлено работой системы в реальном масштабе времени Исходя из этого, рассмотрим возможности использования нескольких наиболее распространенных методов выделения трендов нестационарных временных рядов и оценим их с позиции универсальности и простоты реализации при обеспечении определенной точности получаемых результатов

Метод наименьших квадратов при наличии аномально больших отклонений измеренных значений приводит к некорректным результатам Вместе с тем любая функция, в частности детерминированная составляющая процесса загрязнения водной среды, на коротком интервале может быть аппроксимирована полиномом первого порядка При этом в зависимости от характера функции и требуемой точности получаемых результатов необходимо регулировать длину интервала Для такой аппроксимации наиболее подходящим является **метод скользящих средних**, возможность использования которого рассматривается ниже

Проведенные исследования показали, что процессы загрязнения водной среды по контролируемым параметрам имеют линейные тренды хотя бы в течение нескольких дней, а случайная составляющая образует узкополосный случайный шум, который подчинен нормальному закону распределения вероятностей На основании изложенного формализуем задачу

Пусть $x_p(t)$ – измеренное значение p-го контролируемого параметра в ih_t момент времени (p = 1, , m, i = 1,. ,N), m – число контролируемых параметров Известно, что вектор X_p = (x_p(1) , , $x_p(N)$) является нормально распределенным случайным вектором с ковариационной матрицей W_p и математическим ожиданием A_p^T = = (a_p(1), , $a_p(N)$) Известно также, что элементы вектора математического ожидания связаны между собой линейно Используем структуру **скользящего среднего**

$$a_p(i) = d_{p0} - \left(\frac{N+1}{2} - i\right) d_{p1}, \qquad i = 1, \ ,N \tag{9 2}$$

Задача заключается в нахождении оценок d_{p0} и d_{p1} на основе измеренных данных x_p(1), , $x_p(N)$ Используем **метод максимального правдоподобия** Введем обозначения

$$C^T = (C_1, \ ,C_N), A_p^T = (d_{p.0}, \ ,d_{p1}) = I^T d_{p.0},$$

где C = (N+1)/2 – i, i = 1, , N, I – **единичный N-мерный вектор-столбец**

Во введенных обозначениях логарифм функции правдоподобия L определяется с точностью до константы по формуле

$$\ln L_{\infty} = \tfrac{1}{2}(X_p - A_p)^T W_p^{-1} (X_p - A_p)$$

Оценки максимального правдоподобия величины d_{p0} и d_{p1} определяются решением систем уравнений

$$\frac{\partial \ln L}{\partial d_{p0}} = X_p^T W_p^{-1} I - A_p^T W_p^{-1} I = 0,$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial d_{p1}} = -X_p^T W_p^{-1} C + A_p^T W_p^{-1} C = 0$$

Эта система решается относительно $d_{p.0}$ и $d_{p.1}$ следующим образом

$$d_{p.1} = \hat{d}_{p.0} \frac{I^T W_p^{-1} C}{C^T W_p^{-1} C} - \frac{X_p^T W_p^{-1} C}{C^T W_p^{-1} C}, d_{p.0} = \frac{X_p^T W_p^{-1} I - \dfrac{X_p^T W_p^{-1} C}{C^T W_p^{-1} C} C^T W_p^{-1} I}{I^T W_p^{-1} C - \dfrac{C^T W_p^{-1} C}{C^T W_p^{-1} C} C^T W_p^{-1} I + I^T W_p^{-1} I} \tag{9 3}$$

Согласно теореме Гаусса–Маркова, оценка, полученная методом наименьших квадратов (что соответствует оценке максимального правдоподобия при нормальной плотности распределения), является несмещенной с минимальной дисперсией Таким образом, система (9 3) имеет минимальную дисперсию среди несмещенных оценок

На основе (9.2) и (9 3) оценка значения тренда p-го контролируемого параметра в Nh_t момент времени, т е в момент контроля состояния водной среды, вычисляется по соотношению

$$\hat{x}_p(N) = \hat{d}_{p,0} + \frac{N-1}{2}\hat{d}_{p,1} \qquad (9\,4)$$

Прогнозируемое значение тренда p-го контролируемого параметра на l шагов дискретного контроля вперед вычисляется соответственно по соотношению

$$\hat{x}_p(N+l) = \hat{d}_{p,0} + \frac{N+(2l-1)}{2}\hat{d}_{p\,1}$$

Очевидно, что среди оценок $\hat{x}_p(i)$, i = 1, , N минимальную дисперсию имеет $\hat{x}_p\left(\frac{N+1}{2}\right) = d_{p,0}$, где N – нечетное число измерений Поэтому центрированные случайные величины $x_p(j)$, j = 1,2,3, , используемые для вычисления авто- и взаимоковариационных функций контролируемых временных рядов, определяются по соотношению

$$x_p(j) = \left[x_p\left(\frac{N+1}{2}\right) - \hat{x}_p\left(\frac{N+1}{2}\right)\right]_j, \quad j = 1,2,\ldots,$$

где j – порядковый номер обработки очередных N измерений из общего числа к данному моменту времени.

Использование оценок (9 3) в автоматизированных системах контроля состояния водной среды связано с определенными трудностями

В о-п е р в ы х,необходимо знание ковариационных матриц W_p,p=1, ,m, что требует проведения предварительных исследований временных рядов до запуска системы для нахождения оценок этих матриц

В о-в т о р ы х, необходимы значительные материальные и временные затраты, что не всегда приемлемо

В-т р е т ь и х, и это наиболее существенно, в оценках (9 3) содержится процедура обращения матрицы, что зачастую приводит к неработоспособности алгоритмов при обработке натурных данных

Для устранения отмеченных трудностей поступим следующим образом Предположим, что измерения $x_p(i)$, i = 1, , N некоррелированы, т е матрицы W_p диагональные. Нетрудно убедиться, что в таком случае оценки (9 3) принимают вид

$$\hat{d}_{p,0} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_p(i),$$
$$\hat{d}_{p,1} = \frac{12}{N(N^2-1)}\sum_{i=1}^{N}\left(i - \frac{N+1}{2}\right)x_p(i) \qquad (9\,5)$$

Оценки (9 5) являются несмещенными оценками с минимальной дисперсией соответствующих параметров при отсутствии ковариации между измерениями одновременных параметров При известном значении одной из величин ($d_{p,0}$ или $d_{p,1}$)выражением (9 5) дается минимальная граничная дисперсия (МГД) – оценка для другого параметра

Объем выборки измерений N осуществляют на основе экспериментального исследования каждого контролируемого объекта исходя из соотношения

$$D(\hat{x}_p(N)) = \frac{D(x_p(N))}{N-2} = \frac{\sigma_p^2}{N-2},$$

имеющего место при истинности гипотезы о линейности тренда за рассматриваемый период времени, и из достоверности принятия решения о состоянии водной среды на основе $\hat{x}_p(N)$ Здесь σ_p^2 – дисперсия одного измерения p-го контролируемого параметра В табл 9 1 приведены результаты использования оценок (9.3) и (9 5) для выделения линейных трендов по реальным данным, полученным по загрязнениям реки Кура (Кавказ) Вычисления проводились для N = 5, 7, 9 Качество работы алгоритмов оценивалось нормированной суммой квадратов отклонения измеренных данных от выделенных трендов (при n = 50)

$$\rho_p^2 = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[x_p(i)\right]^2$$

На основе фактических данных заключаем. результаты, полученные по модели (9 3), не настолько лучше результатов, полученных по модели (9 5), чтобы компенсировать сложность реализации и продолжительность работы ЭВМ при использовании модели (9 3)

При выделении трендов 12-ти наблюдаемых параметров модель, основанная на оценках (9 3), «работает» примерно в 5-6 раз медленнее модели, основанной на оценках (9.5). При этом необходимая оперативная память для реализации модели (9 3) примерно в два раза больше, чем память, требуемая для модели (9 5) Превышение суммы квадратов отклонений для модели (9 3) при небольшом значении тренда процесса (вторая строка в табл 9 1) объясняется тем, что в расчетах используется не точное значение ковариационной матрицы W_p, а ее оценка Погрешность оценки ко-

Таблица 9.1 Сравнительные данные линейных трендов по реке Кура

ρ_t^2 при N = 5	ρ_t^2 при N = 7	ρ_t^2 при N = 9
0,041203/0,044033	0,066433/0,065077	0,075127/0,084673
0,00135/0,000068	1,398750/0,000088	0,004245/0,000091
0,139832/0,165129	0,158416/0,177840	0,168426/0,184294
0,271215/0,320923	0,310514/0,347523	0,323349/0,359671
0,051696/0,057596	0,059127/0,063913	0,065096/0,070894
0,002246/0,002351	0,002844/0,003352	0,002935/0,003682
0,133240/0,155617	0,169995/0,191906	0,174761/0,196909
0,977676/1,189959	0,366807/0,401060	0,482023/0,506096
1,753221/1,915817	1,939037/2,183129	2,118587/2,3214443
4,577705/5,438052	0,017511/0,018520	0,026807/0,022936
11,815250/14,175118	14,695220/16,593079	16,326172/18,519470
0,012643/0,014280	0,019045/0,020053	0,023725/0,024632

Примечание В числителе – данные, полученные по оптимальной модели, в знаменателе – по модели скользящего среднего

вариационной матрицы влечет относительно большую ошибку при выделении небольшого по абсолютным значениям тренда временно́го ряда Сравнение результатов моделирования при разных N показывает, что в данном случае для вычисления трендов наилучший результат дает выборка, состоящая из пяти измерений

Для определения оптимального объекта выборки измерений N, используемого при выделении линейного тренда, а также для обнаружения выбросов контролируемых временных рядов, классификации качества объектов водной среды и вычисления достоверности принятого решения относительно ее состояния, требуется расчет дисперсионных матриц векторов текущего значения трендов временных рядов контролируемых параметров и их прогнозов на один и два шага дискретизаций вперед

Принимая во внимание уравнения (9.4), (9 5), определяем коэффициент ковариации между оценками $\hat{x}_p(N)$ и $\hat{x}_t(N)$

$$r_{p,t}(\hat{x}_p(N),\hat{x}_t(N)) = M\times\left[\frac{1}{N}\sum_{i=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)}\dot{x}_p(N_1+i)+\frac{6}{N(N+1)}\sum_{i=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)}i\dot{x}_p(N_1+i)\right]$$
$$\times\left[\frac{1}{N}\sum_{j=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)}\dot{x}_t(N_1+j)+\frac{6}{N(N+1)}\sum_{j=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)}i\dot{x}_t(N_1+j)\right]$$

где M – знак математического ожидания, $\dot{x}_p(N_1+i)$, $\dot{x}_t(N_1+j)$ – центрированные значения соответствующих величин, $N_1 = (N+1)/2$

После несложных преобразований получим

$$r_{p,t} = \sum_{i=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)} \sum_{j>i} A(i,j)R_{p,t}(j-i) + \sum_{i=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)} \sum_{j<i} A(i,j)R_{p,t}(i-j) + \tag{9.6}$$

$$+ R_{p,t}(0) \sum_{i=\frac{1}{2}\cdot(N+1)}^{\frac{1}{2}\cdot(N-1)} A(i,i); \quad p,t = 1,, m,$$

где $R_{p,t}(i)$, $i = 0,1, \ ,N-1$, – взаимоковариационная функция p и t параметров,

$$A(i,j) = \frac{1}{N^2} + \frac{6(i+j)}{N^2(N+1)} + \frac{36ij}{N^2(N+1)^2}$$

Соответствующие коэффициенты корреляции вычисляются по соотношениям

$$\mu_{p,t} = \frac{r_{p,t}}{\sigma_{\hat{x}p(N)}\sigma_{\hat{x}t(N)}}, \quad p,t = 1, \ ,n, \ p \neq t,$$

где $\sigma^2_{\hat{x}p(N)} = r_{p,p}$; $\sigma^2_{\hat{x}t(N)} = r_{t,t}$.

Аналогично вычисляются элементы корреляционной матрицы для прогнозируемых значений параметров на один шаг дискретизации вперед

$$r1_{p,t}(\hat{X}_p(N+1), \hat{X}_t(N+1)) = \frac{1}{\sigma_{\hat{x}_p(N+1)}\sigma_{\hat{x}_t(N+1)}} \times$$

$$\times \left\{ \sum_{i=\frac{1}{2}(-N+1)}^{\frac{1}{2}(N-1)} \sum_{j>i} A1(i,j)R_{p,t}(j-i) + \sum_{i=\frac{1}{2}(-N+1)}^{\frac{1}{2}(N-1)} \sum_{j<i} A1(i,j)R_{p,t}(i-j) + \right. \tag{9.7}$$

$$\left. + R_{p,t}(0) \sum_{i=\frac{1}{2}(-N+1)}^{\frac{1}{2}(N-1)} A1(i,j) \right\}, p,t = 1, \ m, \ p \neq t,$$

где

$$\sigma^2_{\hat{x}p(N+1)} = 2 \sum_{i=\frac{1}{2}(-N+1)}^{\frac{1}{2}(N-1)} \sum_{j>i} A1(i,j)R_{p,p}(j-i) + R_{p,p}(0) \sum_{i=\frac{1}{2}(-N+1)}^{\frac{1}{2}(N-1)} A1(i,i),$$

$$p = 1, \ ,m,$$

$$A1(i,j) = \frac{1}{N^2} + \frac{6(i+j)}{N^2(N-1)} + \frac{36ij}{N^2(N-1)^2}$$

При прогнозе на два шага дискретизации вперед в выражениях (9 6) и (9 7) участвуют коэффициенты $A2(i, j)$

$$A2(i, j) = \frac{1}{N^2} + \frac{6(N+3)(i+j)}{N^2(N^2-1)} + \frac{36(N+3)^2 ij}{N^2(N^2-1)^2}$$

Аналогично можно получить выражения для вычисления ковариационной матрицы вектора оценок

$$\hat{X}^T(N) = (\hat{x}_1(N), \quad , \hat{x}_m(N)),$$

полученного по модели (9 3), но в этом случае соответствующие выражения становятся очень громоздкими и неудобными для практической реализации

9.2. Математическое моделирование распространения примесей в водных средах

Физико-химические параметры, характеризующие состояние водного объекта, непрерывно изменяются во времени под воздействием антропогенных, естественных гидрологических и гидробиологических условий, а также факторов формирования стока Нестационарный случайный процесс этих изменений можно описать уравнением

$$S_p(t) = m_s^p(t) + x_p(t), \quad p = 1, \quad , m,$$

где $S_p(t)$ – значение p-го контролируемого параметра водного объекта, $m_s{}^p$ – детерминированная составляющая процесса, $x_p(t)$ – стохастическая составляющая, m – число контролируемых параметров

Поэтому задачу определения математических моделей распространения примесей в водных объектах можно разделить на две части 1) разработка модели, описывающей детерминированную составляющую, 2) разработка модели, описывающей стохастическую (случайную) составляющую Ниже приводятся диффузионные и статистические модели, аппроксимирующие детерминированную составляющую, и стохастические модели, аппроксимирующие случайную составляющую

Диффузионные и статистические модели распространения примесей в водных объектах Моделирование загрязнения природных вод – достаточно сложная задача Это обусловлено большим числом факторов, влияющих на процесс загрязнения, и разнообразием форм загрязнения Ограничимся рассмотрением моделей, описывающих процессы переноса и разбавления вредных веществ, а также самоочищения водных объектов за сравнительно небольшой промежуток времени

Распространение загрязняющего вещества в водотоке наиболее полно описывается уравнением трехмерной турбулентной диффузии неконсервативных веществ

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial S}{\partial z}\right) - V\frac{\partial S}{\partial x} - KS, \qquad (9\,8)$$

где S – концентрация загрязняющего вещества, t – время, x, y, z – пространственные координаты, K_x, K_y, K_z – коэффициенты турбулентной диффузии в направлении осей x, y, z, V – скорость водотока, K – коэффициент неконсервативности В общем случае коэффициенты K_x, K_y, K_z, K и V являются функциями координат пространства и времени

Решение уравнения (9 8) относительно концентраций $S(x, y, z, t)$ затруднено Поэтому в зависимости от условий спуска сточных вод, характеристик водотока и целей, для достижения которых строятся математические модели, делаются определенные упрощающие допущения, преобразующие уравнение (9 8) трехмерной турбулентной диффузии в двух- и одномерные уравнения разного вида Решение последних осуществляется аналитически либо численными методами

В случае непрерывно действующих вдоль берега реки источников сбросов концентрации загрязняющих веществ распределяются неравномерно по водотоку. Пренебрегая неравномерностью их распределения по глубине водотока, от уравнения (9 8) можно перейти к уравнению двухмерной турбулентной диффузии

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} - V\frac{\partial S}{\partial x} - KS + f, \qquad (9\,9)$$

где f – интенсивность сброса источника загрязнения

Решением уравнения (9 9) определяется распределение концентрации вещества по длине и ширине потока с учетом неравномерности этого распределения Решение осуществляется численными методами сеток с переходом к соответствующей разностной схеме В случае, когда распределение концентрации вещества по сечению водотока близко к равномерному или интерес представляют усредненные показатели загрязнения водотока, пользуются уравнением одномерной турбулентной диффузии, которое в общем случае имеет вид

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - V\frac{\partial S}{\partial x} - KS + f(x,t), \qquad (9\,10)$$

где $f(x,t)$ – функция источников загрязняющего вещества в водотоке

Предполагается, что концентрация вещества постоянна в сечении, т е $\partial S/\partial y = \partial S/\partial z = 0$, коэффициент продольной турбулентной диффузии K_x

постоянен, скорость водотока и коэффициент неконсервативности K – постоянные величины

Уравнение (9 10) решается при определенных начальных и граничных условиях, учитывающих формирование качества водотока При мгновенном точечном источнике единичной массы загрязняющего вещества справедливо соотношение $f(x,t) = \delta(x)\delta(t)/\omega$, где ω – площадь живого сечения δ-функции При первом начальном условии $S(x,0) = 0$ решение уравнения (9 10) имеет вид.

$$S(x,t) = \frac{1}{2\omega\sqrt{\pi K_x t}} l^{\frac{-(x-Vt)^2}{4Dt}},$$

справедливость которого для малых рек и каналов доказана экспериментально

При начальных и граничных условиях

$$S(x,0) = \zeta(x),\ S(0,t) = f(t),\ x \in [0,\infty],\ t \in [0,\infty]$$

решение уравнения (9 10) имеет вид

$$S(x,t) = U(x,t)l^{\mu x - \lambda t},$$

где

$$\mu = \frac{V}{2a^2},\ \lambda = \frac{V^2}{4a^2} + K,\ a^2 = K_x,\ U(x,t) = \omega(x,t) + W_0(x,t),$$

$$W(x,t) = \frac{x}{2a\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\psi(t-\tau)\exp\left(-\frac{x^2}{4a^2\tau}\right)}{\tau^{3/2}} d\tau,$$

$$W_0(x,t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \int_0^\infty \varphi(\theta)\left[\exp\left(-\frac{(\theta-x)^2}{4a^2 t}\right) - \exp\left(-\frac{(\theta+x)^2}{4a^2 t}\right)\right] d\theta,$$

$$\varphi(x) = \zeta(x)\exp(-\mu x),\ \psi(t) = f(t)\exp(\lambda t)$$

При начальных и граничных условиях

$$S(X,t_0) = \psi(X),\ S(x_0,t) = \eta(t),\ f(X,t) = \sum_{i=1}^{k} a_i(t)\delta(X - X_i),$$

$$x_i \in \tau_x,\ X \in [x_0,\infty],\ t > t_0,$$

т е когда на водный объект действует K независимых источников загрязнения, расположенных в пространственных точках x_i рассматриваемого участка водного объекта J_X с интенсивностями загрязнения $a_i(t)$ ($i = 1, \ldots, k$), решение уравнения (9 10) имеет вид

$$S(X,t_0) = S_1(X,t) + S_2(X,t) + S_3(X,t),$$

$$S_1(X,t) = \sum_{i\ 1}^{k} \int_{t_0}^{t} g_a(X,x_i,t,\tau)a_i(\tau)d\tau,$$

$$S_2(X,t) = \int_{t_0}^{t} g_\eta(X, x_0, t, \tau)\eta(\tau)d\tau;$$

$$S_3(X,t) = \int_{x_0}^{\infty} g_\psi(X, x, t, t_0)\psi(x)dx,$$

где функция влияния i-го источника $a_i(t)$

$$g_a(X, x_i, t, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{K_x\pi(t-\tau)}}\exp\left[\mu(X-x_i)\lambda(t-\tau)\right]\times$$

$$\times\left\{\exp\left[-\frac{(X-x_i)^2}{4K_x(t-\tau)}\right]-\exp\left[-\frac{(X+x_i)^2}{4K_x(t-\tau)}\right]\right\}$$

функция влияния граничного условия $\eta(t)$:

$$g_\eta(X, x_0, t, \tau) = \frac{(X-x_0)}{2\sqrt{K_x\pi(t-\tau)^3}}\exp\left[\mu(X-x_0)\lambda(t-\tau)-\frac{(X-x_0)^2}{4K_x(t-\tau)}\right]$$

функция влияния начального распределения $\psi(X)$; $\mu = v/2K_x$; $\lambda = K+v^2/4K_x$.

$$g_\psi(X, x, t, t_0) = \frac{1}{2\sqrt{K_x\pi(t-t_0)}}\exp\left[\mu(X-x)\lambda(t-t_0)\right]\times$$

$$\times\left\{\exp\left[-\frac{(X-x)^2}{4K_x(t-t_0)}\right]-\exp\left[-\frac{(X+x)^2}{4K_x(t-t_0)}\right]\right\}.$$

Проведем сравнительный анализ решения одно- и двухмерного уравнения турбулентной диффузии неконсервативных веществ при постоянных значениях параметров потока, коэффициентов турбулентной диффузии и неконсервативности При кусочно-постоянной аппроксимации функции $f(t)$, $X = 0$ и условии ограниченности функции $S(X,t)$ для достаточно больших значений X уравнение (9 10) может быть решено следующим образом

$$S(X, t_m) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m-1} f_{i-1}\left[(Q_{m-i+1} - Q_{m-i}) + (R_{m-i+1} - R_{m-i})\right], \qquad (9\ 11)$$

где $f_i = f(t_i)$, $t_i = i\Delta t$, $i = 1, ., m$, Δt – шаг разбиения временнóй оси

$$Q_j = \exp\left(\frac{V-V_0}{2K_x}x\right)erfc\left(\frac{X-j\Delta tV_0}{2\sqrt{K_x j\Delta t}}\right), \qquad (9\ 12)$$

$$R_j = \exp\left(\frac{V+V_0}{2K_x}x\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{x+j\Delta tV_0}{2\sqrt{K_x j\Delta t}}\right), \qquad (9\ 13)$$

$$V_0 = \sqrt{V^2+4KK_x}$$

Для более простого случая постоянного единичного сброса выражение (9 11) упрощается и с учетом (9 12) и (9 13) принимает вид

$$S_0(X,t) = \frac{1}{2}\left[G(X,t,V_0)+G(X,t,-V_0)\right], \qquad (9\ 14)$$

где $\sigma(X,t,\xi) = \exp\left[\frac{(V+\varepsilon)x}{2K_x}\right]\operatorname{erfc}\frac{x+t\xi}{2\sqrt{K_x t}}$

Величина V_0 определяется соотношением (9 13)

Одномерная модель турбулентной диффузии неконсервативных веществ удовлетворительно описывает процессы самоочищения и распространения загрязняющих веществ в малых потоках с небольшими скоростями течения, причем полученные на основе этой модели решения применимы на участках, расположенных ниже некоторого створа, называемого створом полного смешения Однако для решения большинства задач качественной оценки вод условие применимости одномерной модели является недостаточным В связи с этим возникает необходимость разработки количественных оценок, которые позволяли бы определять границы действия модели одномерной турбулентной диффузии в зависимости от значений параметров потока, характеристики загрязняющего вещества и вида его сброса Для решения этой задачи рассмотрим подробнее уравнение двухмерной турбулентной диффузии (9 9)

Примем нулевые начальные условия, т е $S(x, y, 0) = 0$, при следующих граничных условиях

$$\left.\frac{\partial S}{\partial y}\right|_{y=0,\ y=H} = 0, \qquad (9\ 15)$$

$$\left.\frac{\partial S}{\partial x}\right|_{x=\infty} = 0 \qquad (9\ 16)$$

(здесь H – ширина потока) Предположим, что источник загрязнения помещен в начало координат, а интенсивность сброса меняется по закону $f(t)$ и ослабевает по ширине потока по экспоненциальному закону, т е

$$S(0,y,t) = f(t)\exp(-\beta y),\ \beta \ge 0,\ 0 \le y \le H \qquad (9\ 17)$$

Если ввести безразмерную координату $\eta = (\pi/H)y$ и новую искомую функцию $U(x,\eta,t) = S(x,\eta,t)\exp(kt)$, то система уравнений (9 9), (9 15) и (9 16) преобразуется к виду

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + b^2 \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} - V \frac{\partial U}{\partial x}, \quad U(x,\eta,0) = 0, \quad \left.\frac{\partial U}{\partial x}\right|_{x=\infty} = 0,$$

$$U(0,\eta,t) = f(t)\exp(-\alpha\eta + Kt), \quad \left.\frac{\partial U}{\partial \eta}\right|_{\eta=0,\pi} = 0, \tag{9 18}$$

где $a^2 = K_x$, $b^2 = (\pi^2/H^2)K_y$, $\alpha = (H/\pi)\beta$ (9 19)

Для упрощения дальнейших математических выкладок ограничимся случаем постоянного сброса единичной интенсивности, т е рассмотрим решение системы (9 18) при $f(t) = 1$ В результате последовательного применения к этой системе конечного косинус-преобразования Фурье по переменной η

$$F(X,p,t) = F_0\left[U(X,\eta,t)\right] = \int_0^{\pi} U(X,\eta,t)\cos p\eta d\eta, \tag{9 20}$$

подстановки $\overline{F} = F\exp(\lambda X + \mu t)$, где $\lambda = V/(2a^2)$, $\mu = b^2p^2 - V^2/(4a^2)$, и преобразования Лапласа по переменной t

$$\overline{F}(X,p,\xi) = L\left[\overline{F}(X,p,t)\right] = \int_0^{\infty} F(x,p,t)\exp(-\xi t)dt,$$

получаем следующую систему

$$a^2 \frac{\partial^2 \overline{F}}{\partial x^2} - \xi\overline{F} = 0, \quad \left.\left(\frac{\partial \overline{F}}{\partial x} + \lambda F\right)\right|_{x=\infty} = 0,$$

$$F(0,p,\xi) = \frac{1-(-1)^p \exp(-2\pi)}{p^2+\alpha^2} \frac{\alpha}{\xi - (k-\mu)}$$

Решение этой системы можно представить в виде

$$\overline{F}(x,p,\xi) = \frac{\alpha}{\xi-(k-\mu)} \frac{1-(-1)^p\exp(-\alpha\pi)}{\alpha^2+p^2} \exp\left(-\frac{\sqrt{\xi}}{\alpha}x\right)$$

Последовательно применяя к этому выражению обратное преобразование Лапласа, соотношение (9 20), обратное преобразование Фурье, а также учитывая, что $S(x,\eta,t) = U(x,\eta,t)\exp(-Kt)$, и принимая во внимание (9 19), решение систем уравнений (9 9), (9 15) и (9 18) можно представить в виде

$$S(x,y,t) = \frac{1-\exp(-\beta H)}{\beta H} S_0(x,t) + \beta H \sum \frac{1-(-1)^p\exp(-\beta H)}{(\beta H)^2 + (\pi p)^2} \times$$
$$\times \left[G(x,t,V_p) + G(x,t,-V_p)\cos\left(\frac{\pi}{H}py\right)\right], \tag{9 21}$$

$$V_p = \sqrt{V^2 + 4K_x\left(\frac{\pi}{H}p\right)^2 + K_y + K}, \tag{9 22}$$

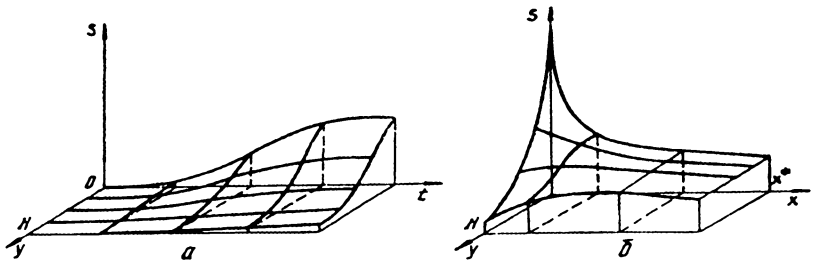


Рис 9 1 Графическое изображение концентрации $S = S(x, y, t)$ при фиксированном значении (а) продольной координаты x и в установившемся (б) режиме $t = 0$

$S_0(x,t)$ и $G(x,t,\xi)$ определяются по формуле (9 14)

Из условия (9 17) следует, что случай, когда параметр сброса $\beta = 0$, соответствует равномерному по ширине потока сбросу загрязняющего вещества При этом решение (9 21) уравнения двухмерной турбулентной диффузии совпадает с решение одномерной задачи, так как

$$S(x,y,t)\big|_{\beta=0} = = S_0(x,t),$$

где $S_0(x,t)$ – решение одномерного уравнения турбулентной диффузии (9 14)

Анализ системы уравнений (9 21) показывает, что при фиксированном значении отношения y/H увеличение ширины потока H в n раз равносильно уменьшению коэффициента K_l в n^2 раз

Характерный вид функции $S(x,y,t)$, полученной по формуле (9 21) при фиксированном значении x, приведен на рис 9 1*а*

Детальный анализ формулы (9.21), проведенный на ЭВМ, позволил сделать следующие выводы 1) возрастание β приводит к увеличению неоднородности $S(x,y,t)$ по ширине потока, т е величина

$$\Delta S = \left[S(x,0,t) - S(x,H,t)\right] / S(x,0,t) \qquad (9\ 23)$$

возрастает с увеличением значения β; 2) увеличение координаты x, напротив, приводит к уменьшению ΔS, начиная с некоторого значения x^*, величина ΔS становится практически равной 0, т е створ, отстоящий от места сброса на расстоянии x^*, является створом полного смешения,3) величина x^*, являющаяся границей действия двухмерной модели, зависит от значения параметра сброса β, скорости V, ширины H, коэффициента K_x и практически не зависит от коэффициента неконсервативности K

Для уточнения зависимости x^* от параметров β, V, H и K_x был рассмотрен стационарный режим процесса распространения загрязняющего вещества при единичной функции сброса, т е случай, когда $t = \infty$ При этом выражения для S_0 и S, определяемые по формулам (9 14) и (9 21), упрощаются и принимают соответственно вид

$$S_0 = S(x) = \frac{1}{2} E(x, V_0), \qquad (9\ 24)$$

$$S = S(x,y) = \gamma S_0(x) + \beta H \sum_{p=1}^{\infty} C_p E(x, V_p) \cos\left(\frac{\pi y}{H} p\right), \qquad (9\ 25)$$

где

$$\gamma = \left[1 - \exp(-\beta H)\right] / \beta H, \tag{9 26}$$

$$E(x, V_p) = \exp\left[\frac{(V - V_p)x}{2K_x}\right], \tag{9 27}$$

$$C_p = \left[1 - (-1)^p \exp(-\beta H)\right] \Big/ \left[(\beta H)^2 + (\pi p)^2\right] \tag{9 28}$$

V_p определяется соотношением (9.22), p = 0,1,2,3, .

Характерный вид функции $S(x,y)$, определяемый формулой (9 25), представлен на рис 9 1*б*

Величина x^* определялась как минимальное значение координаты x, начиная с которого относительная погрешность ΔS (9 23) не будет превышать 5%

$$\left[S(x,0) - S(x,H)\right] / S(x,0) < 0{,}05, \tag{9 29}$$

где $S(x,0)$ и $S(x,H)$ определяли, в соответствии с (9 25), из соотношений

$$S(x,0) = \gamma S_0 + \beta H \sum_{p=1}^{\infty} C_p E(x, V_p),$$

$$S(x,H) = \gamma S_0 + \beta H \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p C_p E(x, V_p),$$

S_0 – по формуле (9 24), γ, E и C_p – по формулам (9 26) – (9 28)

Условие (9 29), используемое для нахождения x^*, можно представить в виде

$$39\sigma_1 - \sigma_2 < \gamma S_0, \tag{9 30}$$

где $\sigma_1 = \beta H \sum_{l=1}^{\infty} C_{2l-1} E(x, V_{2l-1})$, $\sigma_2 = \beta H \sum_{l=1}^{\infty} C_{2l} E(x, V_{2l})$.

Анализ значений x^* (км), полученных с помощью ЭВМ из условия (9 30) при различных значениях параметров V (км/ч), K_x (км^2/ч), H (км) и β, позволил установить следующую зависимость

$$x^* = \varphi(K_x) V \tilde{H}^2 (1 - \exp(-\beta H)), \tag{9 31}$$

здесь $\varphi(K_x)$ представляет собой функцию, близкую к линейной относительно переменной K_x; $\tilde{H}$ – приведенное значение ширины потока, определяемое соотношением $\tilde{H} = 0{,}06H / \sqrt{K_y}$

Линеаризация функции $\varphi(K_x)$ позволила представить формулу (9 31) для нахождения границы действия двухмерной модели в виде

$$x^* = (1{,}55K_x + 0{,}44) V H^2 \frac{1}{K_y} \left[1 - \exp\left(-\beta \frac{0{,}06}{\sqrt{K_y}} H\right)\right]$$

В случаях, когда сброс загрязняющего вещества сосредоточен в основном по ширине, т е значение β достаточно велико, для нахождения x^* можно пользоваться более простой формулой

$$x^* \approx 0{,}45V(1/K_y)H^2$$

Эту формулу можно использовать для получения верхней оценки значения x^*, если величина β неизвестна. В случаях, когда сточные воды вызывают существенное увеличение расхода воды в водотоке, для учета неустановившегося движения потока путем расчета его гидравлических характеристик пользуются уравнением Сен-Венана

$$W\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q,\quad \frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial (VQ)}{\partial x}=q\omega\left(\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{Q|Q|}{K^2}\right), \qquad (9\ 32)$$

где W – ширина водной поверхности, z – отметка свободной поверхности, Q – расход воды, V – скорость течения воды, q – интенсивность бокового притока воды, ω – площадь живого сечения русла, K – модуль расхода $(K=\omega\cdot C\sqrt{R})$, C – коэффициент Шези, R – гидравлический радиус

Задачи (9 32), как и (9 10), решаются численными методами, в частности методом сеток Если объем измерительной информации значим (в смысле математической статистики), то необходимо перейти к более простым статистическим моделям, которые к тому же более устойчивы к погрешностям измерений по сравнению с достаточно сложными моделями

Суть разработки статистических моделей можно проиллюстрировать на таком примере Разобьем контролируемый водоток на j-1 участок в контролируемых створах Рассмотрим один из этих участков Пусть контролируемый j-й участок водотока подвергается воздействию p_j сосредоточенных контролируемых источников загрязнения В дискретные моменты времени n = 1, , N в контролируемых створах и местах воздействия источников загрязнения измеряется концентрация $C_{ip}(n)$ i-х ингредиентов и расходы водных масс $Q_p(n)$, p = 1, , p_j Влияние на качество воды других факторов загрязнения учитываются некоторой дискретной функцией $v_{ij}(n)$ Обозначим через $q_{ip}=C_{ip}Q_p$ (p = 1, , p_j) расход массы i-й примеси на рассматриваемом участке водотока С учетом обозначений запишем обобщенную модель трансформации i-й примеси на j-м участке водотока

$$C_{i,j+1}(n)=q_{i,j+1}(n)Q_{j+1}(n),$$

$$q_{i,j+1}(n)=F_{ij}(q_{ij}(n),q_{i1}(n),\ ,q_{ip}(n),\bar{\lambda}_{ij},v_{ij}(n)),$$

$$Q_{j+1}(n)=\psi_{ij}(Q_j(n),Q_1(n),\ ,Q_p(n),\bar{\lambda}_{ij},v_{ij}(n)),$$

где $\bar{\lambda}_{ij}=(\lambda_{ij1},\ ,\lambda_{ijd})$ – d-мерный вектор неизвестных параметров, F_{ij}, ψ_{ij} – неизвестные функции

Задача статистического моделирования заключается в выборе структуры модели (вид функций K_{ij} и ψ_{ij}) и ее неизвестных параметров путем минимизации выбранного критерия

$$\Phi(\hat{F}_{ij}, \hat{\psi}_{ij}, \hat{\bar{\lambda}}_{ij}) = \min_{F,\psi\in\Omega,\bar{\lambda}_{ij}\in R^c} \sum_{n=1}^{N} \rho\left\{q_{ij}(n), Q_{j+1}(n), \hat{F}_{ij}, \hat{\psi}_{ij}, \hat{\bar{\lambda}}\right\} h(n),$$

где ρ – функционал невязок, $h(n)$ – функция веса, определяющая важность информации в n-й момент времени, R^c – c-мерное евклидово пространство

В зависимости от выбранного вида функции F_{ij}, ψ_{ij} и функции невязок ряда В Стародомский с соавторами предлагает статистические модели распространения примеси в водотоке Некоторые из них будут рассмотрены ниже при анализе методов прогнозирования состояния водных объектов Здесь же отметим, что статистические модели все шире применяются в задачах моделирования состояния водных объектов благодаря простоте, устойчивости к случайным флуктуациям, отсутствию необходимости глубокого изучения протекающих физико-химических процессов

Для оценки качества математических моделей, а также для сравнения их между собой необходимы объективные критерии эффективности этих моделей Такими критериями являются точность моделирования, простота и наглядность разработанных моделей, требования к объему и качеству необходимой измерительной информации и т д. Наиболее существенный из критериев – точность моделирования Для объективной оценки точности разработанных моделей необходим расчет их качества на независимых данных, не участвующих в идентификации моделей В Стародомский в качестве такого критерия эффективности моделей рекомендует величину $RR = s/\sigma^2$, где s – среднеквадратичные отклонения моделируемого процесса от наблюдаемого, σ^2 – дисперсия реального процесса Величина RR является относительной мерой качества математической модели к характеристике разброса реального процесса Она пропорциональна количеству информации о реальном процессе с использованием математической модели В случае, когда дисперсия реального процесса неизвестна и ее оценка связана с определенными трудностями, для сравнения качества двух моделей можно использовать критерий

$$\hat{RR} = s_1 / s_2,$$

показывающий соотношение между среднеквадратичными отклонениями рассматриваемых моделей

Моделирование стохастических составляющих распространения примесей в водных объектах. Как правило, стохастическая составляющая процесса формирования состояния окружающей среды (9 4) аппроксимируется гауссовско-марковским рядом благодаря его предельным свойствам Поскольку объекты водной среды многомерны, ограничимся рассмотрением моделирования многомерных марковских рядов Одномерные марковские ряды являются их частным случаем

Моделирование многомерных случайных рядов на ЭВМ широко применяется при решении многих прикладных задач Все методы моделирования случайных рядов подразумевают наличие определенной априорной информации: многомерной функции распределения либо спектральной плотности, вектора математических ожиданий и ковариационой функции и т д , которые, как правило, даются в виде результатов наблюдений и с помощью которых оцениваются неизвестные характеристики случайного ряда Погрешность, допущенная в оценках, влияет на точность результатов моделирования.

Рассмотрим зависимость точности моделирования от погрешности оценки характеристик моделируемого ряда. Стационарный гауссовский ряд полностью определяется заданием ковариационной матрицы Поэтому m-мерный гауссовско-марковский ряд $X(t) = (x_1(t), .., x_m(t))$ с глубиной связности N можно представить в виде:

$$x_p(t) = \sum_{l=1}^{p-1} b_l^p x_l(t) + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{N} a_{ij}^p x_i(t-j) + \sigma_p^2 \xi_p(t), \qquad (9\,33)$$

где b_l^p, a_{ij}^p – коэффициенты, зависящие от авто- и взаимоковариационных функций m-мерного случайного ряда $x(t) = (x_1(t), x_2(t), , x_m(t))$, σ_p^2 – остаточная дисперсия случайного ряда $x_p(t)$, $\xi_p(t)$ – стандартная нормально распределенная случайная величина

Неизвестные коэффициенты и остаточная дисперсия в (9 33) определяются по методу наименьших квадратов. С помощью обозначений

$$R_{k,l}(|h-j|) = \begin{cases} R_{k,l}(|h-j|) & при \quad h \geq j, \\ R_{l,k}(|h-j|) & при \quad h < j, \end{cases}$$

$$k,i = 1,..,m; \quad j,n = 1,..,N;$$

$$A_p^T = (b^p, a^p)_{1\times[mN+(p-1)]}; \quad C_p^T = (R_{k,l}(h))_{1\times mN};$$

$$B_p = (R'_{k,l}(|h-j|))_{mN\times[mN+(p-1)]}, \quad p = 1,\ldots,m,$$

где $R_{k,l}(|h\text{-}j|)$ – соответствующие ковариации,

выражение для неизвестных коэффициентов принимает вид

$$A_p = B_p^{+} C_p, \qquad (9\,34)$$

где B_p^{+} – псевдообратная матрица,

выражение для остаточной дисперсии записывается в виде

$$\sigma_p^2 = R_p(0) - \sum_{l=1}^{p-1}\sum_{k=1}^{p-1} b_l^p b_k^p R_{l,k}(0) - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{N} a_{kl}^p a_{ij}^p R'_{i,k}(|l-j|) - \\ - 2\sum_{l=1}^{p-1}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{m} b_c^p a_{ij}^p R_{i,l}(j), \qquad (9\,35)$$

где $R_p(0)$ – дисперсия p-го случайного процесса.

Оценим погрешность моделирования Она зависит, прежде всего, от точности оценок значений ковариационных функций, натурных данных, а также от точности решения системы линейных уравнений (9 34) Введем обозначение

$$X_p^T(t-1) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_{p-1}(t), x_1(t-1), x_1(t-2), \ldots, x_1(t-N), x_2(t-1), \ldots, x_m(t-N)),$$
$$p = 1, \ldots, m.$$

Размеры вектора столбца $X_p(t-1)$ равны $[mN+(p-1)] < 1$ Перепишем (9 33) следующим образом:

$$x_p(t) = A_p^T X_p(t-1) + \sigma_p \xi_p(t); \quad p = 1, \ldots, m, \tag{9 36}$$

где A_p – определяется выражением (9.34)

Элементами матриц B_p и C_p являются значения авто- и взаимоковариационных функций, вычисленных по экспериментальным данным Поэтому в реальном случае известны не точные значения матриц B_p и C_p, а их оценки $\hat{B}_p$ и $\hat{C}_p$ Обозначим $\hat{B}_p = B_p + \xi_p$, $\hat{C}_p = C_p + \varepsilon_p$, где ξ_p и ε_p – матрицы погрешностей вычисления матриц B_p и C_p, соответственно Тогда в реальном случае для определения A_p имеем систему уравнений

$$\hat{B}_p A_p = \hat{C}_p \tag{9 37}$$

Обозначим через $\hat{A}_{p0}$ нормальное псевдорешение системы (9 37) Тогда $\hat{A}_{p0} = \hat{B}_p + \hat{C}_p$, и имеет место равенство $\hat{A}_{p0} = A_{p0} + \Delta A_{p0}$, где ΔA_{p0} – абсолютная погрешность вычисления матрицы A_{p0} Обозначим также

$$\delta A_{p0} = \frac{\left\| \hat{A}_{p0} - A_{p0} \right\|}{\left\| A_{p0} \right\|}; \quad \delta B_p = \frac{\left\| \xi_p \right\|}{\left\| B_p \right\|}, \quad \delta C_p = \frac{\left\| \varepsilon_p \right\|}{\left\| C_p \right\|},$$

где $\| \ \|$ – евклидова норма соответствующей матрицы

Предположим, что δB_p и δC_p – достаточно малые величины Тогда справедлива оценка

$$\delta A_{p0} \le \mathrm{cond}^+ B_p (\delta B_p + \delta C_p), \tag{9 38}$$

где $\mathrm{cond}^+ B_p = \| B_p \| \| B_p^+ \|$ - число обусловленности матрицы B_p

Использование оценки $\hat{A}_{p0}$ в (9 36) приводит к ошибкам моделирования, т е в действительности моделируется случайный ряд

$$\hat{x}_p(t) = \hat{A}_{p0}^T X_p(t-1) + \hat{\sigma}_p \xi_p(t); \quad p = 1, \ldots, m, \tag{9 39}$$

где $\hat{\sigma}_p = \sigma_p + \Delta\sigma_p$; $\Delta\sigma_p$ – абсолютная погрешность вычисления остаточной дисперсии σ_p.

Предположим, что известны точные значения исходных векторов $X_1(t-1)$, , $X_1(t-N)$, $X_2(t-1)$, , $X_m(t-N)$, а также остаточные дисперсии моделируемого процесса σ_p, $p = 1$, , m Перепишем (9 39) в виде

$$\hat{x}_p(t) = (A_{p0}^T + \Delta A_{p0}^T) X_p(t-1) + \sigma_p \xi_p(t), \quad p = 1, \quad , m \tag{9 40}$$

Рекуррентная формула определения генерируемого случайного ряда на k-м шаге имеет вид

$$\hat{x}_p(t+k) = (A_{p0}^T + \Delta A_{p0}^T) X_p(t+k-1) + \Delta X_p(t+k-1) + \sigma_p \xi_p(t+k),$$

где $X_p(t+k-1)$ – вектор точных значений генерируемого ряда на $(t+k-1)$-ом шаге, $\Delta X_p(t+k-1)$ – вектор абсолютных погрешностей на $(k-1)$-м шаге вычисленных значений генерируемого ряда

$$\Delta X_p^T(t+k-1) = (\Delta X_1(t+k-1) X_1(t+k-2), \quad ,$$

$$\sum_{i=1}^{p-1} \Delta X_i(t+k-1) X_i(t+k-2), \ \Delta A_1^T X_1(t+k-2), \ \Delta A_1^T X_1(t+k-3), \quad ,$$

$$\Delta A_1^T X_1(t+k-N-1), \ \Delta A_2^T X_2(t+k-2), \quad , \ \Delta A_2^T X_2(t+k-N-1), \quad ,$$

$$\Delta A_m^T X_m(t+k-2), \quad , \ \Delta A_m^T X_m(t+k-N-1))_{1\times[mN+(p-1)]}$$

Абсолютная погрешность вычисленного значения генерируемого ряда

$$\left|\Delta x_p(t+k)\right| = \left\| A_{p0}^T \Delta X_p(t+k-1) + \Delta A_{p0}^T \hat{X}_p(t+k-1) \right\|, \tag{9 41}$$

где $\hat{X}_p(t+k-1)$ – вычисленные значения генерируемого ряда на $(t+k-1)$-м шаге

Определим условие, которому должна удовлетворять погрешность вычисления оценок элементов взаимоковариационной матрицы генерируемого ряда, чтобы для любого $k \geq 1$ имело место соотношение

$$P\left(\left|\Delta x_p(t+k)\right| \leq \gamma_p\right) \geq 1-\alpha, \ \forall p \quad p \in (1, \quad , m) \tag{9 42}$$

С учетом (9 38), (9 41) получаем

$$P\left(\left|\Delta x_p(t+k)\right| \leq \gamma\right) \geq P\left(\left\|A_{p0}^T\right\| \cdot \left\|\Delta X_p(t+k-1)\right\| + \left\|\Delta A_{p0}^l\right\| \cdot \left\|\hat{X}_p(t+k-1)\right\| \leq \gamma\right) \geq$$

$$\geq P\left(\left\|A_{p0}^T\right\| \cdot \left\|\Delta X_p(t+k-1)\right\| + \mathrm{cond}^+ B_p(\delta B_p + \delta C_p) \cdot \left\|\hat{X}_p(t+k-1)\right\| \leq \gamma\right)$$

Следовательно, если γ определяется из условия

$$P\left(\left\|A_{p0}^T\right\| \cdot \left(\left\|\Delta X_p(t+k-1)\right\| + \mathrm{cond}^+ B_p(\delta B_p + \delta C_p) \cdot \left\|\hat{X}_p(t+k-1)\right\| \right) \leq \gamma\right) = 1-\alpha, \tag{9 43}$$

то будет иметь место (9 42)

Рассмотрим случай, когда в модели (9 33) не учитываются текущие значения моделируемых рядов, т е когда $b_l^p = 0$, $l = 1, \ldots, p-1$, $p = 1, \ldots, m$ При этом матрица B_p получается квадратичной

Случайная величина $\hat{X}_l(t-j)$ подчинена нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным 0, и дисперсией $R_l(0)$ Поэтому всегда можно найти величину β_l, для которой имеет место соотношение

$$P\left(|\hat{x}_l(t-j)| \le \beta_l\right) = 1-\alpha$$

Учитывая свойство воспроизводимости χ^2 распределения вероятностей, записываем

$$P\left(\left\|\hat{X}_p(t+k-1)\right\| \le D\right) = P\left\{\left(\sum_{l=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}\left|\hat{x}_l(t-j)\right|^2\right)^{1/2} \le D\right\} \ge 1-\alpha, \qquad (9\ 44)$$

где $D = N^{1/2}\left(\sum_{l=1}^{m}\beta_l^2\right)^{1/2}$

Для оценки нормы вектора погрешностей аналогично получаем

$$P\left(\left\|\Delta X_p(t+k-1)\right\| \le d\right) = P\left\{\left(\sum_{l=1}^{m}\sum_{j=1}^{\Lambda}\left|\Delta A_l^T X_l(t-j)\right|^2\right)^{1/2} \le d\right\} \ge 1-\alpha, \qquad (9\ 45)$$

где $d = N^{1/2}\left(\sum_{l=1}^{m}\beta_l^2\right)^{1/2}\left[\sum_{l=1}^{m}\left(\mathrm{cond}^{+}B_l\left\|A_{l0}\right\|\left(\delta B_l + \delta C_l\right)\right)^2\right]^{1/2}$

С учетом (9 44), (9 45) соотношение (9 43) можно переписать в виде

$$P\cdot\left\{\left\|A_{p0}\right\|\cdot\left(\left\|\Delta X_p(t+k-1)\right\| + \mathrm{cond}^{+}B_p(\delta B_p + \delta C_p)\cdot\left\|\hat{X}_p(t+k-1)\right\|\right) \le \right.$$
$$\left. \le \left\|A_{p0}\right\|\cdot\left(d + \mathrm{cond}^{+}B_p(\delta B_p + \delta C_p)D\right)\right\} \ge 1-\alpha_0,$$

Если γ_p удовлетворяет условию

$$\left\|A_{p0}\right\|\cdot\left(d + \mathrm{cond}^{+}B_p(\delta B_p + \delta C_p)D\right) \le \gamma_p, \qquad (9\ 46)$$

то будет иметь место соотношение (9 42)

Обозначим максимальную абсолютную погрешность вычисления одного значения ковариационной функции через Δ_R Тогда

$$\left\|\xi_p\right\| \le \left[m^2N^2 + mN(p-1)\right]^{1/2}\Delta_R;\ \ \left\|\varepsilon_p\right\| \le (mN)^{1/2}\Delta_R,$$

и соотношение (9 46) будет иметь вид

$$\Delta_R \le \frac{\gamma_p}{N^{1/2}\left(\sum_{i=1}^{m}\beta_i^2\right)^{1/2}\|A_{p0}\|\left\{N^{1/2}\left[\left(\mathrm{cond}^{+}B_i\|A_{i0}\|D_i\right)^2\right]^{1/2}+\mathrm{cond}^{+}B_pD_p\right\}}, \tag{9 47}$$

где $D_i = \dfrac{\left[m^2N^2+mN(t-1)\right]^{1/2}\|C_i\|+(mN)^{1/2}\|B_i\|}{\|B_i\|\cdot\|C_i\|}$, $i = 1, \quad ,m$

Таким образом, если условие (9.47) выполняется для всех $p = 1, \ldots ,m$, то многомерный гауссовско-марковский ряд генерируется с заданной точностью с вероятностью, большей или равной $1 - \alpha$ Объем выборки n, обеспечивающий вычисление значений ковариационной функции с абсолютной погрешностью, не превосходящей Δ_R, определяется соотношением (9 42)

Рассмотрим теперь общий случай, когда в модели (9 33) учитываются текущие значения моделируемого ряда При этом выражения (9 44), (9 45) соответственно принимают вид

$$P\left(\left\|\hat{X}_p(t+k-1)\right\| \le D\right) = P\cdot\left[\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}\left|\hat{x}_j(t-j)\right|^2+\sum_{l=1}^{p-1}\left|\hat{x}_l(t)\right|^2\right)^{1/2} \le D\right] \ge 1-\alpha, \tag{9 48}$$

где $D = \left[(N+1)\sum_{i=1}^{p-1}\beta_i^2 + N\sum_{i=p}^{m}\beta_i^2\right]^{1/2}$;

$$P\left(\left\|\Delta X_p(t+k-1\right\| \le Q_p\right) =$$

$$= P\cdot\left[\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}\left|\Delta A_i^T X_i(t-j)\right|^2+\sum_{l=1}^{p-1}\sum_{d=1}^{l}\left|\Delta X_d(t+k-1)X_d(t+k-2)\right|^2\right)^{1/2} \le Q_p\right] \ge$$

$$P\left[\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}\left\|\Delta A_i^T\right\|^2\left\|X_i(t-j)\right\|^2+\sum_{l=1}^{p-1}\sum_{d=1}^{l}\left\|\Delta X_d(t+k-1))\right\|^2\left\|X_d(t+k-2)\right\|^2\right) \le Q_d\right] \ge$$

$$\ge 1-\alpha, \tag{9 49}$$

где $Q_1 = d$, $Q_p = \left\{N\sum_{i=1}^{m}\beta_i^2\left[\sum_{i=1}^{m}\left(\mathrm{cond}^{+}B_i\|A_{i0}\|\left(\delta B_i+\delta X_i\right)\right)^2+\sum_{l=1}^{p-1}lQ_l\right]\right\}^{1/2}$

Таким образом, получили рекуррентное соотношение (9 49), позволяющее оценивать сверху случайную величину $\|\Delta X_p(t+k-1)\|$ с заданной вероятностью для общего случая модели (9 33) Следует отметить, что оценки (9 44), (9 45) и (9 48) не зависят от временно́го параметра, т е по-

грешность моделирования многомерного временно́го ряда определяется погрешностью вычисления матриц B_p и C_p, элементами которых являются значения ковариационных функций, а также обусловленностью матриц B_p, нормой векторов A_{p0}, остаточной дисперсией моделируемого ряда σ_p^2, его размерностью и глубиной связности Поэтому до начала моделирования многомерного ряда необходимо с учетом соотношения (9 48) оценить Δ_R – погрешность вычисления значений ковариационных функций, обеспечивающих заданную погрешность моделирования

С учетом ошибки вычислений остаточной дисперсии моделируемого ряда абсолютная погрешность моделирования (9 41) принимает вид

$$\Delta x_p(t+k) = A_{p0}^T \Delta X_p(t+k-1) + \Delta A_{p0}^T \hat{X}_p(t+k-1) + \Delta\sigma_p \xi_p(t+k)$$

Запишем выражение (9 35) в матричной форме

$$\sigma_p^2 = R_p(0) - A_{p1\times[mN+(p-1)]}^T R_{[mN+(p-1)][mN+(p+1)]} A_{p[mN+(p-1)]\times 1} - \\ - 2B1_{p1\times(p-1)}^T R1_{(p-1)\times 1}, \qquad (9\ 50)$$

где

$$B1_p = (b^p)_{(p-1)\times 1},\ R1^T = (R1(1)R1(p-1)),\ R1(l) = (A1_{1\times mN} R(l)_{mN\times 1}),$$

$$l = 1,\ \ ,p-1,\ A1_p^T = (a^p)_{1\times mN}$$

С учетом погрешностей выражение (9 50) можно переписать таким образом

$$\sigma_p^2 + \Delta\sigma_p^2 = R_p(0) + \Delta R_p(0) - (A_p^T + \Delta A_p^T)(R+\Delta R)(A_p + \Delta A_p) - \\ - 2(B1_p^T + \Delta B1_p^T)(R1_p + \Delta R1_p)$$

Отсюда для погрешности вычисления остаточной дисперсии получаем соотношение

$$|\Delta\sigma_p|^2 \le |\Delta R_p(0)| + 2\|A_p^T\|\cdot\|R\|\cdot\|\Delta A_p\| + \|\Delta A_p^T\|\cdot\|\Delta R\|\cdot\|A_p\| + \|\Delta A_p^T\|\cdot\|R\|\cdot\|\Delta A_p\| + \\ + \|\Delta A_p^T\|\cdot\|\Delta R\|\cdot\|\Delta A_p\| + 2(\|R1_p^T\|\cdot\|\Delta R1_p\| + \|\Delta B1_p^T\|\cdot\|R1_p\| + \|\Delta B1_p^T\|\cdot\|\Delta R1_p\|) \qquad (9\ 51)$$

При выполнении условия (9 47) погрешность вычисления дисперсии (9 51) будет незначительной Если в (9 51) пренебречь слагаемыми более высокого порядка, то для оценки погрешности остаточной дисперсии моделируемого процесса справедливо выражение.

$$|\Delta\sigma_p^2| \le \Delta_R + 2(\|A_p^T\|\cdot\|R\|\cdot\|\Delta A_p\| + \|B1_p^T\|\cdot\|\Delta R1_p\| + \|\Delta B1_p^T\|\cdot\|\Delta R1_p\|), \qquad (9\ 52)$$

где

$$\|\Delta R1_p\| = \left(\sum_{l=1}^{p-1}\|\Delta R1(l)\|^2\right)^{1/2},\ \|\Delta R1(l)\| \le \|\Delta A1_p\|\cdot\|R(l)\| + \|A1_p\|\cdot\|\Delta R(l)\| + \|\Delta A1_p\|\cdot\|\Delta R(l)\|,$$

$$\|\Delta R(l)\| \le (mN)^{1/2}\Delta_R,\quad \|\Delta B1_p\| < \|\Delta A_p\|,\ \|\Delta A1_p\| \le \|\Delta A_p\|$$

Ошибка вычисления остаточной дисперсии моделируемого ряда учитывается добавлением в левую часть выражения (9 46) оценки сверху $\Delta\sigma_p^2$, вычисленной по соотношению (9 52)

Приведенные результаты получены в предположении, что система линейных уравнений

$$B_p A_p = C_p \qquad (9\ 53)$$

совместима Совместимость системы (9 53) означает, что

$$B_p^+ B_p - E = 0, \qquad (9\ 54)$$

где E – единичная матрица

Алгоритм вычисления B_p^+ имеет погрешность, поэтому условие (9 54) будет выполняться с определенной погрешностью Обозначим через ΔB_p^+ погрешность вычисления B_p^+, т е $\hat{B}_p^+ = B_p^+ + \Delta B_p^+$ Система совместима, если

$$0 \le \left\| \hat{B}_p^+ B_p - E \right\| \le \left\| B_p \right\| \cdot \left\| \Delta B_p^+ \right\|$$

Несовместимость (9 53) означает, что $M(x_p(t)) \neq A_p^T M(X_p(t-1))$, т е даже при $M(X_p(t-1)) = 0$ имеет место неравенство $M(x_p(t)) \neq 0$, так что $M(x_p(t+k))$ $(k > 0)$ тем более не будет равно нулю Математическое ожидание $x_p(t)$ будет увеличиваться тем быстрее, чем больше элементы вектора A_p, т е модуль вектора A_p Если все элементы вектора A_p меньше единицы, то $M(x_p(t+k))$ с увеличением k будет стремиться к нулю, т е моделируемый случайный ряд со временем установится В противном случае ряд получается расходящимся Аналогично будет вести себя дисперсия ряда Моделируемый ряд получается расходящимся, если заданные ковариационные функции также являются расходящимися Отрицательность рассчитанной по соотношению (9 35) дисперсии означает, что гауссовско-марковский ряд с заданными характеристиками невозможно моделировать по модели (9 33)

Пример Для проверки условия (9 47) смоделировано 2100 реализаций одномерного гауссовско-марковского ряда по (9 33) с автокорреляционной функцией $R(0) = 1$, $R(1) = 0{,}2457$, $R(2) = 0{,}3235$, $R(3) = 0{,}138$, $R(4) = 0{,}0516$, $R(5) = 0{,}0488$, $R(6) = 0{,}00157$, $R(7) = -0{,}00233$, т е $m = 1$, $N = 7$ В этом случае $\left\| B^+ B - E \right\| = 0\ 153105 \cdot 10^{-4}$, $\|C\| = 0{,}434875$, $\|B\| = 2{,}99145$, $\|A\| = 0{,}0519399$, $\|B^+\| = 4{,}603693$, $\mathrm{cond}\ B = 13{,}77171$ Соотношение (9 47) принимает вид $\Delta_R \le 0{,}01833825\gamma$ По значениям ряда были вычислены оценки автокорреляционной функции

$\hat{R}(0) = 0{,}965998$, $\hat{R}(1) = 0{,}256597$, $\hat{R}(2) = 0{,}322361$, $\hat{R}(3) = 0{,}108244$,

$\hat{R}(4) = 0{,}0585888$, $\hat{R}(5) = 0{,}573747$, $\hat{R}(6) = 0{,}00858013$, $\hat{R}(7) = 0{,}0053352$

Согласно(9 42),погрешность вычисленных оценок не превышает $\Delta_R = 0{,}039$ с заданной вероятностью, в чем убеждаемся при непосредственном срав-

нении заданных и вычисленных оценок значений автокорреляционной функции По модели (9 33) моделировались 2100 реализаций одномерного марковского ряда с оценочными значениями автокорреляционной функции При моделировании использовались те же независимые, нормально распределенные псевдослучайные величины, которые применялись при моделировании с заданными значениями автокорреляционной функции Сравнение соответствующих значений моделируемых рядов, полученных в обоих случаях, показало справедливость соотношения (9 42), которое принимает вид $|\hat{x}(t) - x(t)| \le 0{,}471346$ с вероятностью более 0,95

9.3. Прогнозирование состояния водных объектов

Антропогенные воздействия на природный водный объект приводят не только к изменению его состояния в текущий момент времени, но и, зачастую, к далеко идущим последствиям, характер которых необходимо предусмотреть, чтобы предотвратить необратимые нарушения экологического равновесия При этом на будущее следует прогнозировать состояние водного объекта в зависимости от имеющихся или предполагаемых воздействий на него с целью управления этими воздействиями

В зависимости от времени упреждения различают прогноз оперативный – от нескольких часов до нескольких дней, краткосрочный – до месяца, среднесрочный – до года, долгосрочный – до 10 лет и перспективный – до 15-25 лет

Существует множество математических моделей, используемых для прогноза состояния водных объектов Они отличаются друг от друга структурой и сложностью функциональных зависимостей, отражающих закономерности формирования состояния объекта, способом использования имеющейся измерительной информации, способностью адаптации к меняющимся характеристикам объекта, в том числе самоорганизацией структуры на основе заданного множества функциональных зависимостей, критериями самоорганизации, объемом и характером априорной информации и т д Многообразие математических моделей обусловлено не только тем, что изучаемые водные объекты существенно отличаются друг от друга, но и разнообразием задач, для решения которых они создаются Поэтому при разработке новых или применении существующих алгоритмов прогноза состояния водных объектов необходимо исходить из конкретных условий, специфичных для данного объекта, и конечной цели, для достижения которой строится математическая модель

Существующие методы прогнозирования можно объединить в следующие группы экстраполяции, эвристические и математического моделирования В последнее время широкое распространение получили методы математического моделирования, которые, в свою очередь, можно сгруппировать в следующие классы диффузионные, статистические и имитационные Детерминированные модели, описывающие распространение загрязняющих веществ в водных объектах во времени и простран-

стве, достаточно подробно рассмотрены выше Отметим только, что из-за стохастической природы изучаемого явления и сложности оценки неизвестных параметров прогностические качества детерминированных моделей существенно зависят от интервала прогноза И Власовой показано, что предел заблаговременности прогноза погоды по дифференциальным уравнениям принципиально не может превышать 15 суток. При соответствующем подборе структуры и методов идентификации статистические модели позволяют прогнозировать с удовлетворительной точностью практически интересующий интервал времени при правильном использовании экспериментальных данных

Использованию статистических методов для прогнозирования качества водных объектов посвящено огромное количество работ, выявляющих их положительные и отрицательные стороны Остановимся на некоторых из этих методов, наиболее перспективных для решения задачи прогнозирования качества водного объекта

Метод авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) получил широкое распространение и часто используется в разных модификациях для прогнозирования качества природной среды Суть метода заключается.1) в выборе структуры АРПСС на основе расчета конечных разностей от измеренных значений и 2) в последующей оценке неизвестных параметров выбранной структуры путем минимизации отклонений прогнозных значений от измеренных Пример использования метода скользящего среднего применительно к линейной модели прогнозирования временно́го ряда соответствующего параметра водного объекта приведен в разд. 9.1.

В работе В. Белогурова и С. Василенко рассмотрена возможность использования нескольких статистических алгоритмов. метода парного регрессионного анализа, метода интерполяционных полиномов Лагранжа, метода группового учета аргументов (МГУА) – для прогнозирования качества воды р Северский Донец В качестве регрессионной использовались линейная, параболическая, гиперболическая и логарифмическая зависимости Неизвестные параметры оценивались методом наименьших квадратов, а качество прогноза – величиной остаточной дисперсии Наилучшей регрессионной зависимостью оказались линейная и параболическая, дающие примерно одинаковые результаты Качество прогноза улучшается благодаря модификации алгоритма прогнозирования с помощью интерполяционных полиномов Лагранжа

Суть подобной модификации в следующем Если в классическом интерполяционном алгоритме полиномами Лагранжа оптимизировалась степень полинома на основе измерительной информации x_n, x_{n-1}, , то в модифицированном алгоритме наряду со степенью полинома оптимизировался шаг v обучающей последовательности Для прогнозирования величины x_{n+1} при этом использовалась не последовательность x_n, x_{n-1}, а ряд x_{n+1-v}, x_{n+1-2v}, . Число v подбиралось из условия минимума среднего отклонения прогнозируемых значений от измеренных

Алгоритмы МГУА нашли широкое применение при решении разнообразных задач идентификации сложных объектов, их управления, построе-

ния прогнозов Описанию этого алгоритма и результатов использования при прогнозировании сложных, в том числе водных, объектов посвящены многие работы Достоинство данного алгоритма по сравнению с большинством других в том, что структура моделей не задается априори На основе заданного множества базовых функций определенного класса и множества критериев оптимизации алгоритма по МГУА путем самоорганизации выбирается наиболее оптимальная структура и оцениваются ее неизвестные параметры Этот алгоритм дает удовлетворительные гидрохимические прогнозы по временным рядам малой длины, при сильно зашумленной исходной информации он отличается высоким качеством долгосрочных прогнозов.

Автоматизированные системы контроля состояния объектов окружающей среды функционируют в реальном масштабе времени В этих системах прогноз осуществляется по мере поступления результатов очередного измерения Длительность работы алгоритма прогноза совместно с длительностью работы всех прочих алгоритмов обработки и отражения результатов измерения множества контролируемых системой параметров не должны превышать временной интервал между соседними поступлениями измерительной информации Кроме того, из-за ограниченности ресурсов памяти в ЭВМ обычно хранится лишь заданное количество последних измерений Поэтому с точки зрения экономии расчетного времени на ЭВМ, а также повышения оперативности и достоверности прогноза предпочтительны адаптивные алгоритмы, способные уточнять значения оцениваемых параметров по мере поступления измерительной информации Здесь, прежде всего, следует отметить метод экспоненциального сглаживания (алгоритм Р Брауна), а также алгоритмы Качмажа и скользящего среднего с обучением В примере использования алгоритма экспоненциального сглаживания для прогнозирования качества воды р. Северский Донец предполагается, что временной ряд x_t (t = 1, 2, ., n) измеренных значений прогнозируемого показателя описывается полиномом m-й степени

$$y_t = \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{i!} t^i + \varepsilon_t, \qquad (9\ 55)$$

где ε_t – случайный шум По измеренным значениям x_t, t = 1, , n, необходимо построить прогноз на моменты времени (n + θ), θ = 1, ., q

Прогноз временного ряда x_t в момент времени (t+θ) может быть построен с помощью разложения в ряд Тейлора

$$x^*_{t+\theta} = \sum_{k=0}^{m} \frac{\theta^{(k)}}{k!} x_t^{(k)}, \qquad (9\ 56)$$

где $x_t^{(k)}$ – k-я производная в t-й момент времени

Согласно теореме Р Брауна, любая k-я производная от x_t может быть выражена через линейные комбинации экспоненциальных средних, определяемые по формуле

$$S_t^{(k)}(x) = \alpha S_t^{(k-1)}(x) + (1-\alpha) S_{t-1}^{(k)}(x), \qquad (9\ 57)$$

где $S_t^{(k)}(x) = \alpha \sum_{i=1}^{n} (1-\alpha)^i S_{t-i}^{(k-1)}$; $S_{t-i}^{(0)} = x_{t-i}$, α – параметр сглаживания (0 < α < 1)

На основе соотношений (9.55), (9.57) составляется система линейных уравнений относительно коэффициентов a_i, $i = 1, \ldots, n$, решение которой дает рекуррентные формулы для их пересчета. Используя значения этих коэффициентов, по соотношению (9 56) вычисляется соответствующее прогнозное значение

В случае линейной модели $x_t = a_0 + a_1 t + \varepsilon_t$ система уравнений для вычисления оценок $\hat{a}_0$ *и* $\hat{a}_1$ имеет вид

$$S_t^{(1)}(x) = \hat{a}_0 + \frac{1-\alpha}{\alpha}\hat{a}_1; \quad S_t^{(2)}(x) = \hat{a}_0 + \frac{\alpha(1-\alpha)}{\alpha}\hat{a}_1,$$

при этом прогнозируемое значение $x_{t+\theta}^* = \hat{a}_0 + \theta \cdot \hat{a}_1$.

Для определения значений параметра сглаживания α обучающая последовательность $x_1, x_2, \ldots, x_n$ делится на две части По первой из них для различных α строится модель прогноза, качество которой проверяется по второй части. Параметр α принимается равным тому значению, для которого получается наилучший прогноз по второй части обучающей последовательности

Суть метода одношагового алгоритма Качмажа для прогнозирования отдельных компонентов речной воды заключается в следующем

Предполагается, что *i*-й показатель качества водного объекта ($i = 1, 2, \ldots, m$) описывается линейным уравнением

$$y_i(n) = C_i^T X(n),$$

где $y_i(n)$ – значение *i*-го показателя в *n* дискретный момент времени; C_i – $m \times k$-мерный вектор неизвестных параметров, подлежащих оцениванию; $X(n)$ – $m \times k$-мерный вектор выборок из динамических рядов показателей качества воды

$$X(n) = (y_1(n-1), \ldots, y_1(n-k), \ldots, y_i(n-1),$$

$$\ldots, y_i(n-k), \ldots, y_m(n-1), \ldots, y_m(n-k))^T$$

(здесь *m* – количество измеряемых параметров воды, *k* – число шагов, учитывающих при прогнозе предысторию параметров воды).

Прогнозируемое значение параметра y_i на θ шагов вперед вычисляется соотношением

$$y_i(n+\theta) = C_i^T(n) X^*(n+\theta), \quad \theta = 1,2, \ldots, q$$

Компоненты вектора $X^*(n + \theta)$ определяются выражением

$$x_p^*(n+i) = \begin{cases} y_p^*(n+i) & \text{при } i > 0, \\ y_p(n+i) & \text{при } i \le 0 \end{cases}$$

Неизвестные коэффициенты $C_i(n)$ вычисляются по рекуррентному соотношению

$$C(n) = C(n-1) + \frac{y(n) - C^T(n-1)X(n)}{\gamma + X^T(n)X(n)},$$

которое получается путем минимизации усредненного значения квадрата отклонения прогнозируемых значений от измеренных Поправочный коэффициент γ выбирается в каждом конкретном случае на основе экспериментальных данных Известно, что алгоритм дает лучшие результаты, если временной ряд предварительно нормирован В этом случае выборочное среднее и дисперсия рассчитываются по соотношениям

$$\overline{X}(n) = (1-\alpha)\overline{X}(n-1) + \alpha X(n),$$

$$D(X) = \overline{X}^2(n) - (\overline{X}(n))^2,$$

где $\overline{X}^2(n) = (1-\alpha)\overline{X}^2(n-1) + \alpha X^2(n)$, $\alpha\ (0 < \alpha < 1)$ выбирается на основе экспериментальных данных, аналогично приведенному по алгоритму Р Брауна

Метод скользящего среднего. Обозначим через M количество измерений, хранящихся в памяти ЭВМ. Для каждого $N \in \Omega$, где Ω – заданное дискретное множество значений глубины связности алгоритма, по методу скользящего среднего просматривается весь массив до (M-l)-го измерения На каждом подмножестве, состоящем из N измерений, вычисляются коэффициенты скользящего среднего и осуществляется прогноз на l шагов вперед Накапливается сумма

$$S_N = \sum_{i=N+l}^{M-l} (x_p(i) - \hat{x}_p(i))^2$$

и оценивается соответствующая дисперсия

$$D_n = \frac{S_N}{(M - 2l - n - 1)}$$

Окончательный прогноз на l шагов упреждения осуществляется на той глубине связности $N \in \Omega$, которой соответствует минимальная дисперсия D_N

Для прогнозирования состояния водных объектов перспективным представляется использование фильтров Калмана Предположим, что состояние водного объекта $X(t)$ представляется как случайный процесс, описываемый уравнением

$$X(t+1) = \sum_{k=0}^{r} \Phi_k(t) X(t-k) + \varphi(t) + \xi(t) \qquad (9\ 58)$$

Модель наблюдения имеет вид

$$y(t) = \sum_{k=0}^{r} H_k(t) X(t-k) + \eta(t) \qquad (9\ 59)$$

Здесь $\varphi(t)$ – известная детерминированная функция, $\Phi_k(t)$ и $H_k(t)$ – заданные матрицы перехода, $\xi(t)$, $\eta(t)$ – независимые друг от друга шумы

Система разностных уравнений, определяющих фильтр Калмана, позволяет прогнозировать состояние объекта $X(t+\theta)$ на основе измеренных значений $y(1)$, , $y(t)$ для достаточно общего класса нестационарных процессов При нелинейности моделей (9 58), (9 59) возможно использование обобщенного фильтра Калмана с предварительной линеаризацией моде-

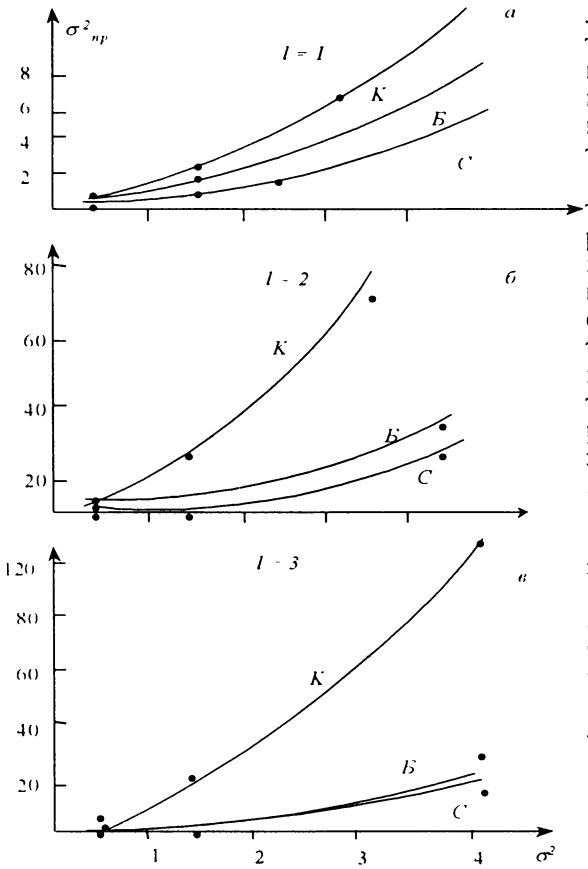


Рис 9 2 Зависимости дисперсии прогноза $\sigma^2_{пр}$ от дисперсии результатов наблюдения σ^2 для различных адаптивных алгоритмов

КБС - результаты, полученные соответственно алгоритмами Качмажа, Брауна и скользящего среднего

лей Недостатком фильтров Калмана является необходимость задания переходных матриц $\Phi_k(l)$ и $H_k(l)$, что зачастую трудноосуществимо

Проведем сравнительный анализ алгоритмов экспоненциального сглаживания, Качмажа и скользящего среднего с обучением с точки зрения достоверности прогноза, простоты реализации алгоритма, экономии необходимой памяти ЭВМ и времени выполнения прогноза На рис 9 2 приведены характеристики этих алгоритмов по данным, полученным при анализе сточных вод Одесского припортового завода

Как показали результаты исследования, алгоритмы экспоненциального сглаживания и скользящего среднего с обучением имеют преимущество перед алгоритмом Качмажа по достоверности прогноза Достоверности этих алгоритмов примерно одинаковы и достаточно высоки вплоть до интервала упреждения прогноза на 24 такта, в то время как алгоритм Качмажа дает сравнительно удовлетворительный результат только при прогнозе на шаг вперед (кривая *1* на рис 9 2) Кроме того, в реализации алгоритм Качмажа сложен, требует большего объема памяти и большего времени для счета на ЭВМ по сравнению с двумя другими алгоритмами

Алгоритм Брауна по быстродействию превосходит алгоритм скользящего среднего с обучением, объем памяти примерно одинаков В реализации оба алгоритма достаточно просты Преимущество алгоритма сколь-

зящего среднего перед другими алгоритмами заключается в том, что для алгоритмов Р Брауна и Качмажа требуется длительное время обучения, зависящее от характеристик прогнозируемого объекта, тогда как время обучения по алгоритму скользящего среднего постоянно и заранее известно Качество работы алгоритмов Р Брауна и Качмажа во многом зависит от значений поправочных коэффициентов, содержащихся в моделях Они выбираются независимо в каждом конкретном случае на основе экспериментальных данных, что затрудняет их использование в автоматизированных системах

Алгоритмы скользящего среднего с обучением и экспоненциального сглаживания с автоматическим выбором наилучшей прогнозируемой модели с оптимальными параметрами реализованы в автоматизированных системах контроля загрязнения водных сред, разработанных в Тбилисском НПО «Аналитприбор»

Результаты работы алгоритмов в реальных условиях эксплуатации подтвердили правильность сделанных выводов Тем не менее их нельзя считать исчерпывающими для принятия окончательного решения о достоинствах и недостатках рассматриваемых алгоритмов прогноза параметров загрязнения водных объектов любой природы Для каждого конкретного объекта и конкретного набора параметров требуются дополнительные исследования

9.4. Оценка состояния контролируемого объекта

Качество окружающей среды определяется многочисленными физико-химическими и биологическими параметрами В зависимости от их значений контролируемая природная среда может находиться в том или ином состоянии Состояние природной среды оценивают путем измерения ее параметров и сравнения их с ПДК При большом количестве соответствующих параметров выполнить эту задачу без ЭВМ затруднительно из-за большого объема вычислений, наличия случайных ошибок, содержащихся в результатах измерений В последнее время во всем мире развернулись работы по созданию обобщенных показателей качества контролируемой среды, основанных на математических моделях, связывающих отдельные их показатели Для водных объектов существует несколько десятков таких показателей – так называемые ИКВ (индекс качества воды) Они отличаются друг от друга числом и типом параметров, используемых для оценки состояния объекта, но и позволяют осуществлять комплексную оценку состояния воды в целом, тогда как с помощью критериев, основанных на непосредственном сравнении измеряемых параметров с ПДК, можно судить лишь о количественном соотношении ее отдельных показателей Применение вычислительной техники в автоматизированных системах дает возможность проводить достоверный контроль состояния среды на основе сравнения измеренных параметров как с ПДК, так и с ИКВ при случайных погрешностях измерения Ниже приведен статистический алгоритм принятия решения о загрязнении объекта окружающей среды, ис-

пользующий измеренные значения контролируемых параметров, искаженные случайными ошибками, коррелированными между собой

Формализуем задачу Пусть состояние объекта характеризуется m параметрами μ_1, , μ_m В зависимости от значения контролируемых параметров μ_i, $i = 1$, , m, объект может или не может считаться загрязненным Согласимся считать объект загрязненным, если значение хотя бы одного контролируемого параметра больше ПДК Введем обозначение

$$\Gamma = \{\mu \quad \mu_i \le a_i, \ \forall i \in (1, \quad ,m)\},$$

где a_i – предельно допустимая концентрация μ_i контролируемого параметра

Область Г является m-мерной параметрической областью для незагрязненного объекта, а $\overline{\Gamma} = R - \Gamma$ – параметрической областью для загрязненного объекта, R – m-мерное параметрическое пространство

Измерения проводятся со случайными ошибками Поэтому принятие решения строится с помощью методов математической статистики, подразумевающих накопление статистической информации

В автоматизированной системе контроля окружающей среды оценка состояния объекта в текущий момент времени осуществляется на основании трендов измеряемых параметров

$$\hat{X}(N) = \{\hat{x}_1(N), \quad ,\hat{x}_m(N)\},$$

вычисленных согласно соотношению (9 4) Математические ожидания оценок $M(\hat{x}_i(N)) = \mu_i$ неизвестны, а элементы дисперсионной матрицы W определяются соотношением (9 6) Задача ставится таким образом необходимо проверить гипотезу H_0 $\mu \in \Gamma$ при альтернативе H_1 $\mu \in \overline{\Gamma}$ Предположим, что результаты измерения распределены по нормальному закону Поскольку измеренные параметры $\hat{x}_i(N), i = 1, \quad ,m$ являются линейными комбинациями нормально распределенных случайных величин, сами они распределены нормально, то случайный вектор $\hat{X}$ подчинен многомерному закону распределения вероятностей

$$P(\hat{X}\mu) = \frac{1}{\left[(2\pi)^m dW\right]^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\hat{X} - \mu)^T W^{-1}(\hat{X} - \mu)\right\}$$

Проверяемые гипотезы охватывают все параметрическое пространство, поэтому решающее правило определяется так если $\hat{X} \in \Gamma$, то принимается гипотеза H_0, в противном случае – гипотеза H_1 Естественно возникает вопрос о достоверности принятого решения Пусть $\hat{X} \in \Gamma$, тогда вероятность ошибки

$$P_{\text{ош}}(\hat{X}, A) = P(H_0 / H_1) = \int_{\overline{\Gamma}} P(\hat{X} / \mu) d\mu \qquad (9\ 60)$$

Нетрудно убедиться, что при $\hat{X} \in \hat{\Gamma}$ для вычисления вероятности неправильного решение получается аналогичный результат

Допустим, что объект находится в одном из заданных M ($M \geq 2$) состояний Предполагаем, что каждое состояние объекта характеризуется заданной областью из пространства значений контролируемых параметров Например, в Польше, Германии и ряде других стран в зависимости от показателей и концентрации загрязняющих веществ воду по степени пригодности подразделяют на несколько (4-5) классов

Обозначим

$$\Gamma_i = \{\mu \quad a_j^i < \mu_j \leq a_j^{i+1}, \quad \forall j \in (1, \quad, m)$$

область принятия H_i ($i = 1, \quad, M$) гипотезы, предполагающей нахождение объекта в i-м состоянии Аналогично частному случаю $M = 2$, рассмотренному выше, решающее правило определяется следующим образом оценивается $\hat{X}$ вектор математических ожиданий по формуле (9 4) и принимается гипотеза, по которой вектор математических ожиданий $\hat{X} \in \Gamma_i$, $i = 1, \quad, M$. Пусть $\hat{X} \in \Gamma_i$, тогда мощность критерия, т е вероятность правильного решения, определяется по формуле

$$P_{\text{ист}}(\hat{X}, \Gamma_i) = \int_{\Gamma_i} P(\hat{X} / \mu) d\mu \qquad (9\,61)$$

9.5. Оценка качества принятого решения

Для определения вероятностей достоверности принятых решений (9 60), (9 61) необходимо вычислить интеграл от многомерной нормальной плотности распределения вероятностей Широко распространено табулирование вычислений функции одно-, двух- и трехмерных вероятностей нормальных распределений, однако использование этих таблиц, с одной стороны, не очень удобно даже при одноразовых вычислениях, а, с другой стороны, практически невозможно в автоматизированных системах Кроме того, использование таблиц для вычисления многомерного интеграла на области сложной конфигурации от нормальной плотности распределения вероятностей невозможно Задача с увеличением размерности значительно усложняется Поэтому создание удобных алгоритмов, позволяющих вычислять упомянутые интегралы на области любой конфигурации с заданной точностью в реальном масштабе времени, – задача первостепенной важности

С этой целью возможно использование методов численного анализа и методов Монте-Карло. Методы численного анализа частично ограничены, поскольку их качество существенно зависит от вида области интегрирования По сравнению с методами Монте–Карло, для их реализации требуется меньше машинного времени, и они гарантируют необходимую точность, однако последние отличаются универсальностью и простотой реализации Ниже приведен алгоритм вычисления многомерного нор-

мального интеграла на заданную область любой конфигурации методом Монте–Карло

Вероятность попадания m-мерного, нормально распределенного случайного вектора $X = (x_1, \ , x_m)$ с математическим ожиданием $\mu = (\mu_1, \ , \mu_m)$ и ковариационной матрицей $W_{m\times m}$ в m-мерную область Г представляет собой интеграл вида

$$P = \int_l \cdots \int \frac{1}{\left[(2\pi)^m \det W\right]^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(X-\mu)^T W^{-1}(X-\mu)\right\} dx \qquad (9\,62)$$

Для удобства записи введем обозначения $Y = X - \mu$, $W^{-1} = V = \|v_{ij}\|_{m\times m}$ Тогда

$$(X-\mu)^T W^{-1}(X-\mu) = Y^T V Y = A(Y,Y)$$

Суть метода Монте–Карло заключается в моделировании серии реализаций случайного вектора $X = (x_1, \ , x_m)$ и вычислении отношения числа, попавшего в область Г, к общему количеству разыгранных значений

Введем такую ортогональную матрицу $\alpha = \|\alpha_{ij}\|_{m\times m}$, столбцы которой являются собственными векторами матрицы V Тогда

$$\alpha^T V \alpha = K = \begin{Vmatrix} k_{11} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & k_{mm} \end{Vmatrix},$$

где k_{ii}, $i = 1, \ , m$, есть i-е собственное число матрицы V, α^T – транспонированная матрица

Обозначим

$$(X-\mu) = \alpha K_1^{-1} Z,$$

где

$$K_1 = \begin{Vmatrix} \sqrt{k_{11}} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sqrt{k_{mm}} \end{Vmatrix}$$

При этом

$$Z = K_1 \alpha^{-1}(X-\mu) = K_1 \alpha^T (X-\mu) \qquad (9\,63)$$

В новых обозначениях квадратичная форма (9 63) запишется так

$$A(Y,Y) = Z^T (K_1^{-1}) \alpha^T V \alpha K_1^{-1} Z = Z^T K_1^{-1} K K_1^{-1} Z = Z^T Z$$

Поскольку α и K_1 – соответственно матрицы собственных векторов и чисел матрицы V, якобиан такого преобразования равен $[\det W]^{1/2}$ Таким образом, интеграл (9 62) принимает вид

$$P = \int_{\Gamma'} \cdots \int \frac{1}{(2\pi)^{m/2}} \exp\left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m} z_i^2 \right\} dz, \qquad (9\ 64)$$

где Γ' - отображение области Γ в пространстве кординат Z, вычисленное согласно (9 63)

Из соотношения (9 64) видно, что координаты вектора Z независимы и распределены нормально с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией

Таким образом, если смоделировать m-мерный случайный вектор $\xi = (\xi_1, \ldots, \xi_m)$, где $\xi_i \sim N(\bullet; 0,1)$ и $\mathrm{cov}(\xi_i, \xi_j) = 0$ при $i \neq j$ и преобразовать его согласно выражению

$$\eta = \mu + \alpha \mathrm{K}_1^{-1} \xi, \qquad (9\ 65)$$

то $\eta = (\eta_1, \ldots, \eta_m)$ будет представлять собой нормально распределенный случайный вектор с математическим ожиданием μ и ковариационной матрицей W

Пусть по соотношению (9 65) вычислены n значений случайного вектора η и пусть какие-то ν из них принадлежат области Γ Тогда

$$\hat{p} = \nu / n \qquad (9\ 66)$$

есть оценка значения интеграла (9 62), вычисленная по методу Монте-Карло

Точность оценки (9 66) зависит от n объема выборки В рассматриваемом случае имеем схему Бернулли, так как у каждого эксперимента два исхода попадание или непопадание реализации случайного вектора η в область Γ Вероятность обоих исходов в каждом эксперименте постоянна Известно, что

$$P\left(\left| \frac{\nu}{n} - p \right| \geq \varepsilon \right) \leq \frac{p(1-p)}{n\varepsilon^2} \leq \frac{1}{4n\varepsilon^2}.$$

Отсюда необходимый объем разыгранных m-мерных векторов определяется из соотношения

$$n = 1/4\alpha\varepsilon^2, \qquad (9\ 67)$$

где ε – требуемая точность вычисления интеграла (9 62), $(1 - \alpha)$ – достоверность достижения требуемой точности

Оценка необходимого объема выборки, вычисленная по соотношению (9 67), в общем случае является завышенной, так как получена для наихудшего случая, когда $p = q = 0,5$ Для определения значительно отличающейся от 0,5 вероятности p с точностью ε объем выборки n, вычисленный по (9 67), намного превышает тот минимальный объем, который необходим для достижения требуемой точности Генерация лишнего количества случайных векторов n увеличивает время, необходимое для вычисления вероятности p.

Для устранения этого недостатка задаем заведомо грубую точность вычисления интеграла (9 62) $\varepsilon_1 > \varepsilon$ и для объема выборки $n_1 = 1/4\alpha_1\varepsilon_1^2$, где

$\alpha_1 \le \alpha$, находим оценку $\hat{p}_{n_1}$ Окончательно объем выборки определяется по соотношению

$$n = \max_{p \in [\hat{p}_{n_1} - \varepsilon_1,\, \hat{p}_{n_1} + \varepsilon_1]} \frac{p(1-p)}{\alpha \varepsilon^2},$$

т е осуществляется максимизация значений случайного вектора η

9.6. Идентификация источников аварийных сбросов в объекты водных сред

Для контроля состояния природной среды прежде всего необходима идентификация источников загрязнения Эта задача особенно актуальна в городских условиях, поскольку из-за большого количества источников загрязнения сложно контролировать каждый из них Решение этой задачи позволит получить не только экологический, но и значительный экономический эффект за счет минимизации технических средств, в частности средств измерений, для автономного контроля каждого источника загрязнения

Рассмотрим задачу идентификации источников загрязнения реки между двумя контролируемыми створами с помощью автоматизированных систем Предполагаемые алгоритмы строятся в предположении, что воды, поступающие в объекты загрязнения, имеют различный состав, либо (при одинаковом составе) отличаются друг от друга соотношением ингредиентов

Пусть состояние речной воды на рассматриваемом участке контролируется M автоматическими станциями Каждая станция контролирует m физико-химических параметров воды Обозначим показатель качества воды на j-й станции, т е в j-м контролируемом створе реки в момент времени t_N, через $\hat{X}_j(t_N) = \{\hat{x}_{jp}(t_N)\}$; $j = 1, \quad, M, p = 1, 2, \quad, m$ Значок $\hat{x}$ над x указывает на то, что для j-го створа известны не точные значения контролируемых параметров, а их оценки

Пусть в момент времени t_N в j-м створе имеет место загрязнение, т е

$$\hat{X}_j(t_N) = \{\hat{x}_{ip}(t_N)\} \in \overline{\Gamma},$$

где $\overline{\Gamma}_j = R - \Gamma_j$, R – m-мерное параметрическое пространство; Γ_j – m-мерная область незагрязненности воды в j-м створе,

$$\Gamma_j = \{\hat{x}_{jp}(t) \quad \mu_{jp}^1 < \hat{x}_{jp}(t) \le \mu_{jp}^2, \ \forall p \in (1, \quad, m)\},$$

$(\mu_{ip}^1, \mu_{ip}^2]$ – область незагрязненности воды по параметру p в j-м створе

В формировании качества воды в j-м створе $\hat{X}_j(t_N)$ принимают участие

– $(j-1)$-й створ с качеством воды $\hat{X}_{j-1}(t_N - \tau_{j-1})$, где $\tau_{j\,l}$ – время добегания воды от $(j-1)$-го створа до j-го створа,

– K – контролируемые объекты с известными концентрациями сбрасываемых веществ $Z_{l\cdot l,k}\,(t_N - \tau_k)$, $k = 1, \ldots, K$, где τ_k – время добегания воды от k-го контролируемого объекта до j-го створа,

– R – неконтролируемые объекты, которые при нормальном режиме работы сбрасывают концентрации $Y_{l\,1,r}\,(t_N - \tau_r)$, $r = 1, \ldots, R$,а (в аварийном режиме возможны дополнительные сбросы $\Delta Y_{j\,1,r}\,(t_N - \tau_r)$, $r = 1, \ldots, R$,

где τ_r – время добегания воды от r-го неконтролируемого объекта до j-го створа

Прочие неконтролируемые факторы называются помехами, их влияние на качество воды в j-м створе обозначим через

$$\overline{X}_0^j(t) = \left\{\bar{x}_{0p}^j(t)\right\}, p = 1, \ldots, m$$

После введения обозначений модель формирования качества воды в j-м створе принимает вид

$$\hat{X}_j(t_N) = F_j\left[\hat{X}_{j-1}(t_N - \tau_{j-1}),\ \lambda_{j-1}, Z_{j-1,k}(t_N - \tau_k),\ \alpha_{j-1,k}(k = 1, \ldots, K\right.$$
$$\left. Y_{j-1,r}(t_N - \tau_r),\ \beta_{j-1,r}(r = 1, \ldots, R)\right] + \overline{X}_0^j(t_N),$$

где F_j – известный оператор, соответствующий процессу формирования качества воды в j-м створе, τ, λ, α, β – параметры, характеризующие время добегания до j-го створа и особенности формирования качества воды в нем

При наличии загрязнения, т е при $\hat{X}_j(t_N) \in \overline{\Gamma}$, модель формирования качества воды имеет вид

$$\hat{X}_j(t_N) = F_j\left[\hat{x}_{j-1}(t_N - \tau_{j-1}), \lambda_{j-1}; Z_{j-1,k}(t_N - \tau_k), \alpha_{j\,1,k}(k = 1, \ldots, K),\right.$$
$$Y_{j-1,r_1}(t_N - \tau_\eta), \beta_{j-1,\eta}(r_1 \in R'),$$
$$\left. Y_{j-1,r_1}(t_N - \tau_\eta), \beta_{j-1,\eta}(r_1 \in R'),\right. \qquad (9\,68)$$

где $R' \cup R'' = R$, $R' \cap R'' = 0$, причем деление R множества на R' и R'' подмножества неизвестно

Задача заключается в разделении множества R на подмножества R' и R'' в момент обнаружения загрязнения При обнаружении загрязнения в j-м створе с помощью оператора F_j из (9 68) определяются концентрации в j-м створе в предположении, что аварийный сброс произвел какой-то один или два и т д или R неконтролируемых объектов, т е вычисляются m-мерные точки $X_j^{i_1, \ldots, i_r}(t_N)$, где $i_j \in (1, \ldots, R)$, $i_{j1} \neq i_{j2}$; r – число некон-

тролируемых объектов, подозреваемых в одновременном аварийном сбросе Число точек $x_j^{i_1, \ldots, i_r}(t_N)$ для каждой совокупности из r_R объектов равно C_R^r, а общее число всех точек равно $\sum_{r=1}^{R} C_R^r = 2^R - 1$ Необходимо решить, какая совокупность r неконтролируемых объектов произвела аварийный сброс, т е необходимо проверить гипотезы

$$H_i \quad M(\hat{X}_j(t_N)) = X_j^{i_1, \ldots, i_r}(t_N), \; i = 1,2, \ldots, 2^R - 1 \qquad (9\,69)$$

В зависимости от имеющейся априорной информации можно рассматривать различные процедуры проверки гипотез (9 69) По мере увеличения априорной информации становится возможным использование более сложных процедур принятия решения, обеспечивающих более высокую их достоверность Рассмотрим эти процедуры в зависимости от увеличения необходимого объема априорной информации

Метод классификации источников аварийных сбросов на основе результатов измерения. В случаях, когда закон распределения вероятностей измеряемой величины $\hat{X}_j(t_N)$ неизвестен, процедура принятия решения основывается на расстоянии между точками $\hat{X}_j(t_N)$ и $X_j^{i_1, \ldots, i_r}(t_N)$.

$$d_{i_1, \ldots, i_r} = d(\hat{X}_j(t_N), X_j^{i_1, \ldots, i_r}(t_N)) \qquad (9\,70)$$

Виновником загрязнения объявляется неконтролируемый объект или их совокупность, которым соответствует минимальное расстояние (9 70) Алгоритм обнаружения виновников загрязнения имеет вид для r = 1 по (9 68) вычисляются точки $X_j^{i_1}(t_N)$ и соответствующие расстояния (9 70) Среди них выбирается минимальный элемент d_1^* Число подозреваемых объектов увеличивается на единицу, т е r = 2 Вычисляются точки $X_j^{i_1, i_2}(t_N)$ и соответствующие расстояния $d_{i_1 i_2}$ Среди них выбирается минимальный элемент d_2^* и т д Из вычисленных $d_1^*, d_2^*, \ldots, d_n^*$ определяется минимальное, и виновником сброса объявляются объекты, соответствующие этому элементу В случае, когда один и тот же объект при аварийном сбросе может сбрасывать различные концентрации, их следует рассматривать как сбросы от разных неконтролируемых объектов и использовать приведенный выше алгоритм

Достоверность принятого решения в данном алгоритме зависит от уровня помехи $\bar{X}_0(t)$. С увеличением отношения $\frac{M(\hat{X}_j(t_N))}{\sqrt{D(\bar{X}_0^j(t))}}$ вероятность неправильной идентификации источников загрязнения уменьшается

При отсутствии ковариационной матрицы вектора измерения $\hat{X}_j(t_\nu)$ в качестве меры расстояния d используется евклидово расстояние

$$d_{\eta_1 \ldots \eta_r} = (\hat{X}_j(t_N) - X_j^{\eta_1 \ldots \eta_r}(t_\nu))^T (\hat{X}_j(t_N) - X_j^{\eta_1 \ldots \eta_r}(t_N))$$

В j-ом створе состояние воды контролируется автоматической станцией, с помощью которой оценивается ковариационная матрица W_j на основе накопленной измерительной информации $\hat{X}_j(t_N)$, $N = 1,2,$

В качестве меры расстояния используется расстояние Махаланобиса

$$d_{\eta_1 \ldots \eta_r} = (\hat{X}_j(t_N) - X_j^{\eta_1 \ldots \eta_r}(t_N))^T W_j^{-1} (\hat{X}_j(t_N) - X_j^{\eta_1 \ldots \eta_r}(t_N))$$

Достоинство данного подхода состоит в простоте реализации и минимально необходимой априорной информации, однако даже при наличии такой информации использовать его невозможно, т к в данной процедуре все источники загрязнения опасны

Ниже приведен другой метод определения виновника аварийного сброса загрязнений

Метод, основанный на приращениях плотностей распределения вероятностей результатов измерения. Для идентификации источников загрязнения в работе С Черкинского предложен следующий подход

Вероятностный характер случайного вектора $\bar{X}_0^j(t)$ может быть определен путем статистической обработки значений $\bar{X}_0^j(t_\nu)$, $N = 1,2,$, вычисленных по соотношению

$$\bar{X}_0^j(t_N) = \hat{X}_j(t_N) - F_j[\cdot]_{t=t_N}, \; N = 1,2,$$

На основе этого соотношения и соотношения

$$\Delta\bar{X}_0^j(t_\nu) = \bar{X}_0^j(t_N) - \bar{X}_0^j(t_{N-1}), \; N = 1,2,$$

находим плотность распределения вероятностей приращений $\Delta X_0^j(t)$ Анализируя процесс очистки и сброса сточных вод r-го контролируемого объекта и основываясь на законе больших чисел, определяем плотность распределения приращений концентрации $\Delta y_{j-1,j}$ при аварийных сбросах Линеаризуя оператор F_j (9 68) на основе найденных плотностей распределения вероятностей для ΔX_0 и $\Delta y_{j-1,j}$, определяем плотности распределения вероятностей приращений концентрации в j-м створе в зависимости от аварийного сброса неконтролируемым объектом r ($r = 1, \; ,R$)

При обнаружении загрязнения в j-м створе рассчитываем величину приращения концентрации в створе и по найденным R плотностям вероятностей находим элементы вероятностей, соответствующие вычисленному приращению концентрации Виновником загрязнения признается тот неконтролируемый объект, которому соответствует наибольший элемент вероятностей

Данный метод имеет ряд недостатков Требуется знание законов распределения случайных помех $\bar{X}_0^j(t)$, а также прирост концентрации сбрасываемых ингредиентов при аварийных сбросах для каждого неконтроли-

руемого объекта Получение этих распределений, особенно прироста концентрации, – весьма сложная и трудоемкая задача Они должны определяться отдельно для каждого рассматриваемого участка реки При одновременном аварийном сбросе несколькими неконтролируемыми объектами ошибки предложенной методики будут ощутимы, поскольку плотности вероятностей приращений концентраций контролируемых ингредиентов выводились в предположении отсутствия одновременного сброса несколькими неконтролируемыми объектами Учитывать коллективные аварийные сбросы в данном подходе в принципе возможно, но в таком случае необходимо знание совместных плотностей распределения прироста концентраций сбрасываемых ингредиентов в аварийных режимах, т е знание всевозможных совместных плотностей распределения $\Delta y_{j-1,r}$, $r = 1, \ldots, R$ Это очень затрудняет практическое решение задачи Для реализации данного подхода необходимо осуществить большое количество вычислений, в том числе вычисление вероятностных интегралов

Пример. Между ($j-1$)-м и j-м контролируемыми створами расположены два неконтролируемых объекта Показатели качества речной воды в этих створах, вероятностные характеристики помехи $\bar{X}_0^j(t)$, а также сбрасываемые концентрации при нормальном y_{ir} и аварийном $y_{ir\,\max}$ режимах приведены в табл 9 2 Принято $M(\bar{X}_0(t))=0$, $D(\bar{X}_0(t))=\sigma^2$, μ_{ij} –предельно допустимая концентрация i-го ингредиента в j-м створе Концентрация хлоридов и нефтепродуктов при $t = t_2$ превышает соответствующие ПДК, что указывает на наличие загрязнения в j-м створе вторым объектом

Таблица 9 2 Вероятностные показатели качества воды при нормальном и аварийном режимах сброса загрязнений

Показатель качества воды	$x_{i,j-1}$		$\frac{y_{i1}}{y_{i2\max}}$	$\frac{y_{i2}}{y_{i2\max}}$	σ_{ij}	$\hat{x}_{ij}(t)$		μ_{ij}
	$t=t_1-\tau$	$t=t_2-\tau$				$t=t_1$	$t=t_2$	
Расход, м^3/с	50	50	$\frac{1}{5}$	$\frac{0.5}{1.0}$	3	52	50	–
Содержание компонентов, мг/л	290	300	$\frac{400}{105}$	$\frac{300}{8000}$	20	323	400	350
хлориды								
сульфаты	300	350	$\frac{700}{2300}$	–	25	374	374	500
азот аммонийный	1.450	1 400	$\frac{5}{800}$	–	0,10	1,40	1 5	2 00
нефтепродукты	0.026	0 027	–	$\frac{0,04}{0,20}$	0,001	0.027	0 3	0 05
железо	0.190	0.170	–	$\frac{1}{10}$	0.02	0.18	0 2	0.50

В качестве модели (9 68) используются уравнения, приближенно описывающие условия спуска сточных вод в водоемы

$$x_{ij}(t) = \begin{cases} x_{i\ j-1}(t-\tau) + \text{при } i = 1, \\ \dfrac{1}{x_{1\ j}(t)}\left[x_{1,j}(t-\tau)x_{i,j-1}(t-\tau) + \sum_{r=1}^{2} y_{1r}y_{ir} \right] + x_{i0}(t) \text{ при } i = 2, \quad ,6 \end{cases}$$

В работе С Черкинского рассчитаны приращения плотностей распределения вероятностей концентрации $\Delta y_{i-1,r}$ при аварийных сбросах Максимальное значение соответствует плотности распределения вероятностей при сбросе вторым объектом Виновником загрязнения признается второй объект

Таблица 9 3 Результаты расчетов концентрации i-го ингредиента в j-м створе в момент времени t_2

Показатель качества воды	$x_{1i}(t_2)$	$x_{2i}(t_2)$	$x_{3i}(t_2)$
Расход, м³/с	50,0	50	50
Содержание компонентов, мг/л			
хлориды	10300,5	468	10464
сульфаты	580,0	364	580
азот аммонийный	81,4	1,500	81,400
нефтепродукты	0,0274	0,031	0,031
железо	0,18	0,370	0,370
Расстояние Махаланобиса	957818,03	72444,970	964112,390
Расстояние Евклида	9958,00	68,732	10066,420

В табл 9 3 приведены результаты расчетов $x_{1i}(t_2)$ – концентрации i-го ингредиента в j-м створе в момент времени t_2 в предположении, что аварийный сброс произвел первый неконтролируемый объект, x_{2i} (t_2) – в предположении, что сброс произвел второй объект, и x_{3i} (t_2) – в предположении, что сброс произвели оба объекта одновременно Величины D_j^2 и d_j, j = 1, 2, 3, – расстояния Махаланобиса и Евклида между шестимерными точками $x_1(t_2)$, $x_2(t_2)$, $x_3(t_2)$ и точкой $\hat{x}_j(t_2)$ Поскольку $D_2^2 < D_1^2 < D_3^2$, а также $d_2 < d_1 < d_3$, заключаем, что аварийный сброс осуществил второй объект Использование в расчетах расстояния Евклида предпочтительнее, чем расстояния Махаланобиса, так как в первом случае не используется дисперсия случайной помехи $\overline{X}_0^j(t)$

Проверка простых гипотез относительно источников аварийных сбросов. В случаях, когда с помощью предварительной обработки измерительной информации или из каких-либо теоретических рассуждений,

основанных на результатах эксперимента, удается установить плотность распределения вероятностей результатов измерения $\hat{X}_j(t_N)$, для принятия решения относительно виновника загрязнения целесообразно использовать априорную информацию и более обоснованно принять конечное решение Процедура эта при некотором усложнении процесса принятия решения обеспечивает заданную мощность критерия

Суть задачи в следующем На основе измеренной m-мерной точки $\hat{X}_j(t_N)$ необходимо принять одну из гипотез (9 69) В дальнейшем для простоты записи будем пользоваться обозначениями

X – m-мерная точка измерения в X^m-пространстве измерения,

a_i – математическое ожидание точки измерения X при истинности H_i, т е $X \equiv \hat{X}_j(t_N)$, $a_i \equiv X^{i_1, \ldots, i_N}(t_N)$,

$P(H_i)$ – априорная вероятность H_i гипотезы,

$P(X/H_i)$ – распределение вероятностей X при условии, что гипотеза H_i истинна, $\delta(X) = \{\delta_1(X), \ldots, \delta_S(X)\}$ – решающее правило, причем

$$\delta_i(X) = \begin{cases} 1, & \text{если выносится решение об истинности гипотезы } H_i, \\ 0 - & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$E_i = \{X \quad \delta_i(X) = 1\}$ – область принятия гипотезы H_i

Поскольку гипотезы H_i, $i = 1, \ldots, s$, являются непересекающимися, то $E_i \cap E_j = 0$ и $\bigcup_{i=1}^{S} E_i = X^m$, где s – число гипотез

Пусть гипотеза H_i истинна. Вводим функцию потерь $L(H_i, \delta(X))$ Тогда риск, соответствующий гипотезе H_i, определяется как

$$\rho(H_i, \delta(X)) = \int_{X^m} L(H_i, \delta(X)) P(X|H_i) dX$$

Для каждого решающего правила $\delta(X)$ функция риска

$$R(\delta(X)) = \sum_{i=1}^{S} \rho(H_i, \delta(X)) P(H_i) = \sum_{i=1}^{S} P(H_i) \int_{X^m} L(H_i, \delta(X)) P(X|H_i) dX \tag{9 71}$$

Задача заключается в нахождении такого решающего правила $\delta^*(X)$, т е таких E_i, $i = 1, \ldots, s$, областей принятия истинности гипотез H_i, для которого

$$R(\delta^*(X)) = \min_{\{\delta(X)\}} R(\delta(X)) \tag{9 72}$$

Рассмотрим случай, когда потери за счет ошибочно принятых гипотез одинаковы, а за счет правильно принятых решений – равны нулю, т е

$$L(H_i, H_j) = \begin{cases} C' & \text{при } i \neq j, \\ 0 & \text{при } i = j \end{cases} \tag{9 73}$$

При этом функция риска

$$R(\delta(X)) = \sum_{i=1}^{S} P(H_i) C' \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{S} \int_{E_j} P(X|H_i) dX = C' \left(1 - \sum_{i=1}^{S} P(H_i) \int_{E_i} P(X|H_i) dX \right) \tag{9 74}$$

Минимум в (9 74) достигается путем решения задачи

$$\sum_{i=1}^{S} P(H_i) \int_{E_i} P(X|H_i) dX \Rightarrow \max_{\{E_i\}} \tag{9 75}$$

Отсюда видно, что без ограничения общности можно принять $C' = 1$

Задача (9 75) решается так

$$E_i = \{X \quad P(H_i)P(X|H_i) > P(H_j)P(X|H_j), \\ \forall j \in (1, \ldots, i-1, i+1, \ldots, s)\}, i = 1, \ldots, s. \tag{9 76}$$

Перепишем выражение (9 71) таким образом

$$R(\delta(X)) = \sum_{j=1}^{S} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{S} L(H_i, H_j) P(H_i) \int_{E_j} P(X|H_i) dX \tag{9 77}$$

Нетрудно убедиться, что оптимальная область E_j принятия H_j гипотезы, минимизирующая функцию риска (9 77), принимает вид

$$E_j = \{X \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{S} L(H_i, H_j) P(H_i) P(X|H_i) < \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{S} L(H_i, H_k) P(H_i) P(X|H_i), \\ \forall k \in (1, 2, \ldots, j-1, j+1, \ldots, s)\}, \quad j = 1, \ldots, s \tag{9 78}$$

Если $L(H_i, H_j) = 0$, то оптимальная область E_j принятия гипотезы упрощается

$$E_j = \{X \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{S} P(H_i) P(X|H_i) < \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{S} L(H_i, H_k) P(H_i) P(X|H_i), \\ \forall k \in (1, 2, \ldots, j-1, j+1, \ldots, s)\}, \quad j = 1, \ldots, s$$

Предположим, что результаты измерения подчинены нормальному закону распределения вероятностей Теоретически это обосновывается тем, что на результаты измерения влияет множество разнообразных факторов, относительная доля в погрешности, измерения которых примерно одинаковая Принять результирующую погрешность нормально распределенной позволяет предельная теорема теории вероятностей Кроме того, анализ экспериментальных данных, полученных анализатором АМА-201 на реке Кура, подтвердил предложение о нормальности распределения вероятностей результатов измерения

Не ограничивая общности, рассмотрим случай некоррелированности компонентов вектора измерений $X = (x_1, \quad , x_m)$, так как предварительной декорреляцией всегда можно получить вектор измерения с некоррелированными компонентами от вектора измерения с коррелированными компонентами Таким образом, в дальнейшем предполагается, что вектор $X = (x_1, \quad , x_m)$ подчинен нормальному закону распределения вероятностей

$$P(X|H_i) = (2\pi)^{-m/2}\sigma^{-m}\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{l=1}^{m}(x_l - a_l^i)^2\right\} \qquad (9\ 79)$$

Обозначим область E_{ij} принятия решений об истинности гипотезы H_{ij}

$$E_{ij} = \left\{X \quad P(H_i)P(X|H_i) > P(H_j)P(X|H_j)\right\} \qquad (9\ 80)$$

Тогда область E_i принятия H_i гипотезы (9 76) в случае **ступенчатой функции потерь** (9 73) перепишется таким образом

$$E_i = \bigcap_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{s} E_{ij}$$

Принимая во внимание (9 79) и (9 80), для области E_{ij} получаем

$$E_{ij} = \left\{X\sum_{l=1}^{m}(a_l^i - a_l^j)x_l > \lambda_{ij}\right\},$$

где

$$\lambda_{ij} = \sigma^2 \ln\frac{P(H_j)}{P(H_i)} - \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{m}\left[(a_l^i)^2 - (a_l^j)^2\right];$$

тогда область E_i принятия H_i гипотезы запишется в виде

$$E_i = \left\{X\sum_{l=1}^{m}(a_l^i - a_l^j)x_l > \lambda_{ij};\ \forall J \in (1,\ldots,\ i-1,\ i+1,\ldots,\ s)\right\}$$

Для определенных таким образом областей принятия решения функция риска вычисляется по соотношению

$$R(\delta(X)) = C\left\{1 - \sum_{i=1}^{S} P(H_i)\prod_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{S}\left[1 - \Phi\left(\frac{\lambda_{ij} - \sum_{l=1}^{m}(a_l^i - a_l^j)a_l^i}{\sigma\sqrt{\sum_{l=1}^{m}(a_l^i - a_l^j)^2}}\right)\right]\right\},$$

где Ф(•) – стандартная табулированная функция нормального распределения

Рассмотрим случай **произвольной функции потерь** Обозначим

$$E_{jk} = \left\{X \sum_{i=1}^{S} L(H_i, H_j)P(H_i)P(X|H_i) < \sum_{\substack{i=1\\ k\neq i}}^{S} L(H_i, H_k)P(H_i)P(X|H_i),\right\}, k \neq j \quad (9\,81)$$

Тогда область E_j принятия гипотезы H_j (9 78) перепишется так

$$E_j = \bigcap_{\substack{k=1\\ k\neq j}}^{S} E_{jk} \quad (9\,82)$$

Преобразуем (9 81) следующим образом

$$\begin{aligned} E_{jk} = \{X \sum_{i=1}^{S-1}\big[L(H_i, H_j) - L(H_i, H_k)\big]P(H_i)P(X|H_i) < \\ < \big[L(H_S, H_k) - L(H_S, H_j)\big]P(H_S)P(X|H_S)\}, k \neq j \end{aligned} \quad (9\,83)$$

Для определенности предположим, что $[L(H_s, H_k) - L(H_s, H_j)] > 0$, и перепишем (9 83) в виде

$$E_{jk} = \left\{X \sum_{i=1}^{S-1}\frac{(L(H_i, H_j) - L(H_i, H_k))P(H_i)}{(L(H_S, H_k) - L(H_S, H_j))P(H_S)} \frac{P(X|H_i)}{P(X|H_S)} < 1\right\}, k \neq j,$$

С учетом (9 79) после несложных преобразований получим

$$E_{jk} = \left\{X \sum_{i=1}^{S-1}\lambda_{j,k}^{i} \cdot \exp\left\{\frac{1}{\sigma^2}\sum_{l=1}^{m}(a_l^{i*} - a_l^j)x_l\right\} < 1\right\}, k \neq j, \quad (9\,84)$$

где

$$\lambda_{j,k}^{i} = \frac{(L(H_i, H_j) - L(H_i, H_k))P(H_i)}{(L(H_S, H_k) - L(H_S, H_j))P(H_S)} \exp\left\{\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{l=1}^{m}\left[(a_l^S)^2 - (a_l^i)^2\right]\right\}$$

Функция риска, соответствующая области принятия истинности гипотезы H_l (9 82), в которой E_{lk} определена выражением (9 84), вычисляется по соотношению (9 77), где

$$\int_{E_l} P(X|H_i)dX = P(X\in E_j|H_i) = P\Big(X \in \prod_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{s} E_{jk}|H_i\Big) =$$
$$= \prod_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{s} P(X \in E_{jk}|H_i) = \prod_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{s} P\left(\sum_{i=1}^{1} \lambda_{j,k}^{i} \exp\left\{\frac{1}{\sigma^2}\sum_{l=1}^{m}(a_l^i - a_l^j)x_l\right\} < 1 \Big| H_i\right) \quad (9\ 85)$$

Если условную плотность распределения вероятностей случайной величины

$$\xi_{k\,j} = \sum_{i=1}^{s} \lambda_{j\,k}^{i} \exp\left\{\frac{1}{\sigma^2}\sum_{l=1}^{m}(a_l^i - a_l^j)x_l\right\}$$

обозначить через $P_{k,l}(z\ H_i)$, то (9 85) перепишется в виде

$$\int_{E_l} P(X|H_i)dX = \prod_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{s} \int_{\infty}^{1} P_{k\,j}(z/H_i)dz,$$

и функция риска (9 77) примет вид

$$R(\delta(X)) = \sum_{i=1}^{s} P(H_i)\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{s} L(H_i, H_j)\prod_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{s} \int_{\infty}^{1} P_{k\,j}(z/H_i)dz$$

Непосредственное нахождение плотности $P_{k,l}(z/H_l)$ для $\xi_{k,l}$ линейной комбинации нормально распределенных случайных величин не удается Возможна ее аппроксимация рядом Эджворта

$$P_{k\,j}(z/H_i) = \alpha(z) - \frac{1}{3!}\frac{[\mu_3]_{k,J}^{i}}{\left[\mu_2^{3/2}\right]_{k,J}^{i}}\alpha^{(3)}(z) + \frac{1}{4!}\frac{[\mu_4]_{k,J}^{i}}{\left[\mu_2^{2}\right]_{k,J}^{i}}\alpha^{(4)}(z) -$$
$$- \frac{1}{5!}\left(\frac{[\mu_5]_{k,J}^{i}}{\left[\mu_2^{5/2}\right]_{k,J}^{i}} - \frac{[\mu_3]_{k,J}^{i}}{\left[\mu_2^{3/2}\right]_{k,J}^{i}}\right)\alpha^{(5)}(z) + \frac{10}{6!}\left(\frac{[\mu_3]_{k,J}^{i}}{\left[\mu_2^{3/2}\right]_{k,J}^{i}}\right)^2\alpha^{(6)}(z) \quad , \quad (9\ 86)$$

где $[\mu_r]_{k,l}^{i}$ – r-й центральный момент случайной величины $\xi_{k,l}$, $\alpha(z)$ – стандартная нормальная плотность распределения вероятностей, $\alpha^{(i)}(z)$ – i-я производная от $\alpha(z)$

Асимптотические свойства рядов Эджворта исследованы Г Крамером, который показал, что при весьма общих условиях ряд (9 86) действительно дает асимптотическое разложение $P_{k,l}(z)$ с остаточным членом порядка первого отброшенного члена Члены порядка $s^{-l/2}$ (где s – число слагаемых в случайной величине $\xi_{k,j}$) в ряде Эджворта содержат моменты μ_3, , μ_{l+2}, которые и необходимы для приближения этого порядка

Центральные моменты $[\mu_r]^l_{k,j}$ определяются соответствующими начальными моментами $[\mu'_r]^l_{k,j}$, для которых имеем

$$[\mu'_r]^l_{k,j} = \sum_{p_1=1}^{s_1} \sum_{p_r=1}^{s_1} (\lambda_{j,k}^{p_1} \quad \lambda_{j,k}^{p_r}) \exp\left\{\frac{1}{2} D(U^j_{p_1 \ldots p_r}/H_l) + M(U^j_{p_1 \ldots p_r}/H_l)\right\},$$

где

$$U^j_{p_1 \ldots p_r} = \sum_{t=1}^{r} y_{p_t j} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{t=1}^{r} \sum_{l=1}^{m} (a_l^{p_t} - a_l^j) x_l,$$

$$M(U^j_{p_1 \ldots p_r}/H_l) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{t=1}^{r} \sum_{l=1}^{m} (a_l^{p_t} - a_l^j) a_l^l,$$

$$D(U^j_{p_1 \ldots p_r}/H_l) = \sum_{l=p_1 \ldots p_r} S^2_{l,j} + 2 \sum_{\substack{l,k=p_1 \ldots p_r \\ l \neq k}} K^j_{l,k},$$

где $S^2_{l,j}$ – дисперсия случайной величины $y_{l,j}$, $K^j_{l,k}$ – корреляция между случайными величинами $y_{l,j}$ и $y_{k,j}$

Определение функции потерь. Вид функции потерь необходимо выбирать таким образом, чтобы, при простоте применения, она максимально отражала специфику рассматриваемой задачи Как известно, квадратичная функция потерь является наиболее удобной Она хорошо отражает суть рассматриваемой задачи чем отдаленнее друг от друга гипотетические точки загрязнения в пространстве измерения, тем больший размер штрафа следует брать за неверно принятое решение При этом каждую координату измеряемой пространственной точки необходимо учитывать с весом, соответствующим опасности загрязняющего ингредиента Введем следующий вид функции штрафов

$$L(H_i, H_j) = \sum_{l=1}^{m} (a_l^i - a_l^j)^2 C_l,$$

где $a^i = (a^i_1, \ldots a^i_m)$, $a^j = (a^j_1, \ldots a^j_m)$ – m-мерные точки пространства измерения, соответствующие гипотезам H_i и H_j, C_l – весовой коэффициент, зависящий от степени вредности l-го ингредиента

Значения C_l необходимо принимать разными в различных ситуациях в зависимости от конкретных целей, стоящих перед задачей обнаружения

Кроме того, необходимо учитывать степень загрязненности контролируемой воды в предположении истинности гипотез H_0 и H_1

Введенная выше ступенчатая функция потерь (9 73) соответствует ситуации, когда неправильное определение любого виновника загрязнения, одинаково нежелательно, так как за этим стоят интересы предприятий (или отдельных участков предприятия), ошибочно обвиненных в нарушении закона о водопользовании Такая функция потерь наилучшим образом выражает интересы предприятия, для каждого из них одинаково нежелательно неправильное обвинение в загрязнении окружающей среды Неступенчатый вид функции потерь наиболее правильно отражает интересы природоохранных органов, с наибольшей достоверностью позволяет обнаружить те предприятия, которые загрязняют окружающую среду опасными веществами В случаях, когда объективное введение функции потерь в зависимости от наносимого ущерба отдельными предприятиями затруднено, вместо безусловной байесовской задачи (9 72) проверки гипотез (9 69) можно перейти к условной байесовской задаче, в которой функции потерь вводятся неявно в виде ограничения на вероятность неправильно обнаруженных источников загрязнения

Проверка сложных гипотез относительно источников аварийных сбросов. Обозначим количество неконтролируемых источников сбросов R Каждый источник сбрасывает m_r ($r = 1, \ldots, R$) параме ров Общее число контролируемых параметров равно m, причем $m_r \le m$, $\forall\ r \in (1, \ldots, R)$ Для каждого источника сбросов заданы m_r-мерные области возможных значений сбрасываемых веществ при нормальной работе $\theta_r \in X^m$ и области возможных значений сбрасываемых веществ при аварийных сбросах ($\Omega_r \in \chi^{m_r}$, где χ^{m_r} – m_r-мерное параметрическое пространство), причем $\theta_r \cap \Omega_r = 0$ Если $\theta_r \cap \Omega_r \neq 0$, то r-й объект сбросов называется неопознаваемым, так как невозможно четко различить нормальное и аварийное состояние r-го объекта Если $\Omega_r \quad \Omega_j$, то r-й и j-й источники аварийных сбросов неразличимы Если $\Omega_r \cap \Omega_j \neq 0$, то r-й и j-й источники сбросов в одних ситуациях (при аварийных сбросах) могут быть различимы, в других – неразличимы Назовем такие объекты аварийных сбросов полуразличимыми

Обозначим параметры сбросов r-го объекта через $y_r = (y_r^1, \ldots, y_{m_r}^r)$, $r = 1, \ldots, R$ На основе введенных обозначений модель формирования качества воды в j-м створе имеет вид

$$\hat{X}_j(t_N) = F_j\left[\begin{array}{l}\hat{X}_{j-1}(t_N - \tau_{j-1}), \lambda_{j-1}, \\ Z_{j-1,k}(t_N - \tau_k), \alpha_{j-1,k}(k = 1, \ldots, K), \\ Y_{j-1,r}(t_N - \tau_r), \beta_{j-1,r}(r = 1, \ldots, R), \\ Y_{j-1,r} \in \theta_r,\ r = 1, \ldots, R\end{array}\right] + \bar{X}_0^j(t_N),$$

При наличии загрязнения модель формирования качества воды принимает вид

$$\hat{X}_j(t_N) = F_j\begin{bmatrix}\hat{x}_{j-1}(t_N - \tau_{j-1}), \lambda_{j-1},\\ Z_{j-1,k}(t_k - \tau_k), \alpha_{j-1,k}(k = 1, \ldots, K),\\ Y_{j-1,r_1}(t_N - \tau_{r_1}), \beta_{j-1,r_1}(r_1 \in R'),\\ Y_{j-1,r_2} + \Delta Y_{j-1,r_2}, \beta_{j-1,r_2}(r_2 \in R'')\end{bmatrix} + \bar{X}_0^j(t_N), \qquad (9\,87)$$

где $R' \cup R'' = R,\ R' \cap R'' = 0;\ Y_{j-1,r_1} \in \theta_{r_1},\ r_1 \in R',$

$Y_{j-1,r_2} + \Delta Y_{j-1,r_2} \in \Omega_{r_2},\ r_2 \in R''$

При обнаружении загрязнения в j-м створе с помощью оператора F_j из (9 87) пересчитываются m-мерные точки $A_j^{r_1, \ldots, r_r}(t_N)$, соответствующие концентрациям в j-м створе в предположении, что аварийный сброс произвел какой-то один, или два и т д , или R неконтролируемых объектов, причем каждому объекту приписываются наивероятнейшие концентрации загрязняющих веществ Наивероятнейшими считаются концентрации, которые соответствуют решениям следующей оптимизационной задачи

$$A_j^{r_1, \ldots, r_r}(t_N) = \arg \min_{\{\cdot\}} d(\hat{X}_j(t_N), F_j[\bullet])$$

при условии $Y_{j-1,r_1} \in \theta_{r_1},\ r_1 \in R',\ Y_{j-1,r_2} \in \Omega_{r_2},\ r_2 \in R''$ Здесь $d(\bullet)$ – мера расстояния между m-мерными векторами $\hat{x}_j(t_N)$ и $F_j[\bullet]$ В качестве меры расстояния можно пользоваться, например, расстоянием Евклида или Махаланобиса Индекс r указывает на число неконтролируемых объектов, подозреваемых в одновременном аварийном сбросе

Если известны условные плотности распределения вероятностей $f(\hat{X}_j(t_N)/F_j[\bullet])$ при $Y_{j-1,r_1} \in \theta_{r_1},\ r_1 \in R',\ Y_{j-1,r_2} \in \Omega_{r_2},\ r_2 \in R''$, то в качестве $A_j^{r_1, \ldots, r_r}(t_N)$ выбираются их m-мерные точки В дальнейшем для определения источника сбросов можно использовать один из приведенных выше алгоритмов проверки гипотез относительно точек $A_j^{r_1, \ldots, r_r^m}(t_N)$

Можно также использовать следующую процедуру виновником в аварийном сбросе признается та совокупность объектов, для которых достигается максимум выражения

$$\int f(\hat{X}_j(t_N)/F_j[\bullet]) P(F_j[\bullet]/Y_{j-1,r_1} \in \theta_{r_1}, Y_{j-1,r_2} \in \Omega_{r_2}) dF_j[\bullet],$$

где интервал источников сброса распространяется на область возможных значений оператора качества воды $F_j[\bullet]$

Выделение наиболее вероятных совокупностей источников, виновных в загрязнении водной среды. С ростом числа неконтролируемых источников сброса R количество вычисляемых точек $X_j^{n_r}(t_N)$ и соответственно количество проверяемых H_i гипотез значительно возрастает При этом процедура принятия решения становится громоздкой и неудобной для реализации в практически приемлемое время Вместе с тем известно, что на качество проверки гипотез влияют только те из них, которые информационно близки к истинной гипотезе Поэтому для сокращения необходимого объема и времени вычисления при принятии решений о виновниках загрязнения необходимо использовать предварительную обработку измерительной информации, позволяющую исключать из дальнейшего рассмотрения заведомо ложные гипотезы

Воспользуемся основным положением теории измерения, заключающимся в том, что измерения с наибольшей вероятностью располагаются около их математического ожидания Выделим вокруг точки $\hat{X}_j(t_N)$ область, в которую она попадала бы с заданной вероятностью при условии, что ее математическое ожидание принадлежит этой области Предположим, что величина $\hat{X}_j(t_N)$ распределена нормально с вектором математических ожиданий μ и ковариационной матрицей W Предположение о нормальности не является слишком грубым, так как известно, что результаты измерения распределены в основном нормально Тогда определяемая область будет иметь вид эллипсоида, радиус которого находится из условия $P((\hat{X}_j(t_N) - X_j^{n_r}(t_N))^T W_j^{-1}(\hat{X}_j(t_N) - X_j^{n_r}(t_N)) \le a) = 1 - \alpha,$

где $(1 - \alpha)$ – заданная вероятность

Согласно Г Крамеру, квадратичная форма

$$Q_j = (\hat{X}_j(t_N) - X_j^{n_r}(t_N))^T W_j^{-1}(\hat{X}_j(t_N) - X_j^{n_r}(t_N))$$

имеет распределение χ^2 с $k = t_r(W_j^{-1}W_j)$ степенями свободы при условии, что имеет место равенство $W_j(W_j^{-1}W_jW_j^{-1} - W_j^{-1}) = 0$ (9 88)

Поскольку W_j является дисперсионной матрицей, то это условие будет выполняться, и $k = t_r(W_j^{-1}W_j) = t_r(E) = m$

Таким образом, радиус эллипсоида определяется решением уравнения

$$P(Q_j \le a) = \int_0^a \chi_m(y)dy = 1 - \alpha$$

относительно a

9.7 Расчет предельно допустимых сбросов

Одна из основных задач в проблеме защиты и управления состоянием водных объектов – установление предельно допустимых сбросов (ПДС) загрязняющих веществ каждому водопользователю исходя из возможности водного объекта сохранять экологическое равновесие при заданном воздействии Расчет ПДС для каждого водопользователя на заданном участке водного объекта – довольно сложная, многофакторная задача, требующая накопленной в процессе наблюдения значительной исходной информации о характере и гидрологических режимах водного объекта, о составе и количестве загрязняющих веществ, сбрасываемых отдельными источниками, о возможности управления этими сбросами, поступающими от источника загрязнения При решении этой задачи необходимо комплексно учитывать интересы всех водопользователей, заключающиеся, в конечном счете, в минимизации целевой функции, учитывающей материальные затраты на обеспечение заданных ПДС

Если обозначить через C_{ij} затраты i-го предприятия на управляющие воздействия U_{ij} для поддержания концентрации j-го загрязняющего вещества в пределах заданных ПДС, то математически задачу можно свести к минимизации суммарных затрат

$$F = \min \sum_{i=1}^{N} f_i(X, C_{ij}(U_{ij}), m_i) \qquad (9\ 89)$$

на поддержание концентрации загрязняющих веществ в пределах ПДК в контролируемых точках водного объекта

$$\varphi_j(X, a, \lambda) \le \text{ПДК}_j, \quad j = 1, \ldots, m \qquad (9\ 90)$$

с учетом возможностей предприятий

$$x_{ij}^{(1)} \le x_{ij}(U_{ij}) \le x_{ij}^{(2)} \qquad (9\ 91)$$

Здесь F_i – функционал, определяющий затраты i-го источника загрязнения,

φ_j – функционал, определяющий концентрацию j-го загрязняющего вещества в контролируемой точке в зависимости от концентрации загрязняющих веществ (X), сбрасываемых источниками загрязнения, их местоположения (a), характеристики водного объекта и условий водопользования (λ),

$x_{ij}^{(1)}$ и $x_{ij}^{(2)}$ – соответственно наименьшее и наибольшее значения, в пределах которых i-е предприятие может поддерживать концентрацию j-го загрязняющего вещества,

N – число источников загрязнения,

m_i – число загрязняющих веществ, сбрасываемых i-м источником загрязнения,

m – общее число загрязняющих веществ в водном объекте

Конкретный вид функционала $f_i(X, C_{ij}(U_{ij}), m_i)$ зависит от специфики производства, вида загрязняющих веществ от i-го источника, характера

управляющих воздействий и способов их уменьшения Математические модели $\varphi_i(X, a, \lambda)$ описаны в разд 9 2

Метод решения оптимизационной задачи (9 89)-(9 91) зависит от конкретных видов функций, входящих в них Как правило, это методы нелинейной оптимизации, использующие конкретные характеристики целевой функции и ограничений Эти методы хорошо известны, и в качестве одного из возможных вариантов расчета ПДС можно рекомендовать метод имитационного моделирования, позволяющий расчетным путем оценивать последствия всех гипотетических действий со стороны водопользователей

Глава 10

Очистка сточных вод с использованием мембран

Традиционные способы очистки сточных вод – механические, биохимические, химические или реагентные – не обеспечивают в большинстве случаев необходимую эффективность очистки Кроме того, классические схемы, как правило, не позволяют создать замкнутый оборот воды на предприятиях, использовать или регенерировать ценные компоненты сточных вод, а также обеспечить их экономически целесообразную утилизацию Например, до настоящего времени нет надежных и эффективных схем очистки сточных вод целлюлозно-бумажных заводов и других производств от нефтепродуктов и отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей, от тяжелых металлов и радионуклидов Во многих странах проводятся исследования по усовершенствованию действующих и разработке новых методов обработки растворов, технологических жидкостей и сточных вод Особый интерес вызывают мембранные методы разделения – обратный осмос, ультрафильтрация и микрофильтрация, позволяющие одновременно очищать технологические жидкости или сточные воды от солей, органических веществ, коллоидов и взвесей

Актуальной проблемой является разработка **локальных систем** очистки промышленных сточных вод и регенерации технологических жидкостей Такие схемы, сочетающие традиционные и баромембранные процессы, обеспечивают не только охрану окружающей среды от отходов предприятий, но и рациональное использование природных ресурсов – возврат в производство очищенной воды и извлечение из отходов ценных компонентов, что позволяет успешно решать проблемы охраны окружающей среды на тех предприятиях, для которых ранее не удавалось найти способа очистки сточных вод

10.1. Баромембранные процессы

Под баромембранными процессами подразумевают четыре вида мембранного разделения, а именно *обратный осмос, нанофильтрацию, ультрафильтрацию и микрофильтрацию* Эти процессы имеют много общего и прежде всего то, что их движущей силой является различие в гидростатическом давлении разделяемого раствора и фильтрата (пермеата)

Баромембранным процессам свойственно явление так называемой **концентрационной поляризации**, т е повышение концентрации растворенного вещества у поверхности мембраны вследствие того, что преимущественно через мембрану переносится растворитель В результате снижается удельная производительность (проницаемость) и селективность мембран,

сокращается срок их службы Для уменьшения отрицательного влияния концентрационной поляризации турбулизируют прилегающий к поверхности мембраны слой жидкости, чтобы ускорить перенос растворенного вещества через мембрану Турбулизация раствора происходит за счет увеличения скорости протекания жидкости вдоль мембраны под воздействием электрических и магнитных полей, ультразвука и т п

Метод обратного осмоса заключатся в фильтровании растворов под давлением, превышающим осмотическое, через полупроницаемые мембраны, пропускающие растворитель и задерживающие молекулы либо ионы растворенных веществ (рабочее давление 2 – 8 МПа)

Ультрафильтрация – процесс мембранного разделения растворов высокомолекулярных и низкомолекулярных соединений, а также фракционирования и концентрирования высокомолекулярных соединений Поскольку осмотические давления высокомолекулярных соединений малы, ультрафильтрацию проводят при невысоких давлениях (0,2 –1 МПа)

Если мембранный процесс применяют для отделения от раствора крупных коллоидных частиц или взвешенных микрочастиц, то его называют *микрофильтрацией* Микрофильтрацию проводят при небольших рабочих давлениях (0,01 – 0,2 МПа)

Нанофильтрацию используют для фильтрования растворов, содержащих молекулы или ионы растворенных веществ и низкомолекулярных соединений Нанофильтрация занимает промежуточное место между обратным осмосом и ультрафильтрацией, а микрофильтрация – между ультрафильтрацией и обычной фильтрацией

Приведенная классификация баромембранных методов является общепринятой На практике при эксплуатации мембранных установок обычно имеет место перекрывание областей использования этих процессов При разделении обратным осмосом, нанофильтрацией и ультрафильтрацией фазовых превращений не происходит, и энергия расходуется в основном на создание давления исходной жидкости, ее перемещение в аппарате и продавливание через мембрану Эта энергия сравнительно невелика Например, расход энергии на опреснение морской воды обратным осмосом составляет 1,8 – 2 ,5 кВт ч/м, в то время как при дистилляции требуется затратить энергии в 10 –15 раз больше Другое преимущество баромембранных методов разделения – простота конструкции установок, которые включают в себя два основных элемента насос для создания давления исходной жидкости и мембранный аппарат Очень важно также, что эти процессы осуществляются при температуре окружающей среды и не сопровождаются фазовыми переходами (как уже отмечалось), что имеет исключительно важное значение для пищевой, микробиологической и медицинской промышленности В нефтехимической и химической промышленности эти методы могут использоваться для разделения углеводоро-

дов, смещения равновесия химических реакций путем удаления одного из продуктов, концентрирования растворов, очистки или выделения высокомолекулярных соединений из растворов, содержащих низкомолекулярные компоненты, и т д , в энергетике и городском хозяйстве – для опреснения воды, в биологии и медицине – для выделения и очистки биологически активных веществ, ферментов, вакцин и т д , в пищевой промышленности – для концентрирования фруктовых и овощных соков, молока и молочных продуктов, получения сахара, яичного порошка и т д

Баромембранные методы находят применение во всех отраслях народного хозяйства, а эффект, который даст широкое их использование для защиты окружающей среды от отходов промышленных предприятий, трудно переоценить Размеры пор мембран, применяемых в баромембранных процессах, приведены в табл 10 1

Таблица 10 1 Размеры пор мембран и условные границы их применения

Процесс	Диаметр пор мембраны, Å (мкм) *	Диаметр частиц, Å (мкм)
Обратный осмос	6–30	1–8
	(0,0006–0,003)	(0,0001–0,0008)
Нанофильтрация	30–80	8–15
	(0,003–0,008)	(0,0008–0,0015)
Ультрафильтрация	80–500	15–200
	(0,008–0,05)	(0,0015–0,02)
Микрофильтрация	500–20000	200–50000
	(0,05–2)	(0,02–5)

*1 Å = 10^{-10} м = 10^{-8} см = 0,1 нм = 10^{-4} мкм

10.2. Механизмы переноса веществ через полупроницаемые мембраны

Известно несколько гипотез, объясняющих механизм процесса разделения растворов с помощью полупроницаемых мембран

Ситовая гипотеза основана на предположении, что в мембране имеются поры, диаметр которых достаточен, чтобы пропустить молекулы растворителя, но мал для прохождения ионов и молекул растворенных веществ, коллоидных и взвешенных микрочастиц

Энергетическая (электростатическая) модель предусматривает наличие в мембране сквозных пор радиусом r Для введения иона в пору требуется затратить энергию

$$\Delta W = W - W_0,$$

где W, W_0 – электростатическая энергия иона в поре и в объеме раствора

Электростатическая энергия иона валентностью z и радиусом b в объеме раствора выражается уравнением

$$W_0 = z^2 e / 2\varepsilon b,$$

где e – заряд электрона, ε – диэлектрическая проницаемость раствора

Значение электростатической энергии иона в сферической поре можно записать в виде

$$W_0 = \frac{z^2 e^2}{2}\left(\frac{1}{\varepsilon' r} - \frac{1}{\varepsilon r} + \frac{1}{\varepsilon b}\right),$$

где ε' - диэлектрическая проницаемость мембраны

Отсюда следует, что для переноса иона из объема раствора в пору, заполненную раствором, необходимо затратить энергию

$$\Delta W = \frac{z^2 e^2}{2\varepsilon r} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{\varepsilon'}$$

Вероятность нахождения иона на таком энергетическом уровне есть функция от $\Delta W/kT$. Концентрация солей в растворе, проникающем через поры мембраны, будет определяться этой вероятностью, т е

$$X_2 = X_1 \exp(-\Delta W / kT), \qquad (10.1)$$

где X_1 и X_2 - концентрация исходного раствора и фильтрата, соответственно, k – постоянная Больцмана, T – температура, К

Из уравнения (10.1) имеем

$$\lg (X_1/X_2) \approx \Delta W / 2{,}3kT. \qquad (10.2)$$

Модель находится в качественном согласии с опытами, показывающими, что отношение концентраций солей в исходном растворе и фильтрате уменьшается при увеличении радиуса негидратированного иона и радиуса пор и увеличивается с ростом отношения ε/ε' и заряда иона $e z$

Капиллярно-фильтрационая (сорбционная) модель полупроницаемости предполагает, что на поверхности и внутри пор лиофильной мембраны (рис 10.1), погруженной в раствор электролита, образуется поверхностный слой связанной воды толщиной t_c. Связанная вода имеет пониженную растворяющую способность, поэтому наличие ее в порах мембраны – одна из основных причин того, что ионы (или молекулы) для которых связанная вода практически не является растворителем, не проходят через мембрану. Если диаметр пор мембраны $d \le 2t_c + d_{г.и}$ ($d_{г.и}$ – диаметр

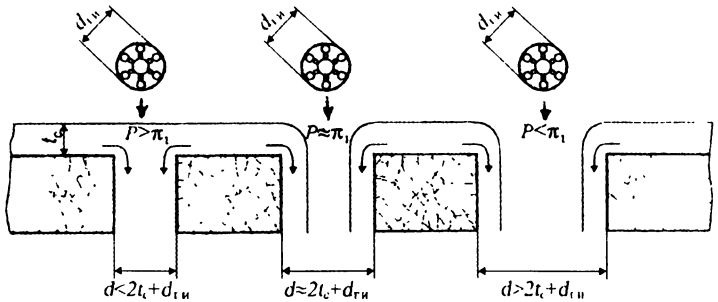


Рис 10 1 Схема капиллярно-фильтрационной модели полупроницаемости
P - рабочее давление, π_1 - осмотическое давление раствора, t_c - толщина слоя связанной воды d - диаметр пор мембраны, $d_{г.и}$ - диаметр гидратированного иона

гидратированного иона), то через поры будет проходить преимущественно вода, что и обусловливает селективность таких мембран

Т к мембраны имеют поры разных размеров, в том числе и крупные ($d > 2\,t_c + d_{г.и}$), связанная вода, хотя и в малых количествах, но все же растворяет неорганические соли Поэтому селективность мембран тем выше, чем больше толщина слоя связанной воды и чем больше гидратирующая способность иона, определяемая энергией или теплотой гидратации При переходе иона из раствора в связанную воду его вторичная гидратная оболочка перестраивается вследствие пониженной диэлектрической проницаемости связанной воды, первичная гидратная оболочка при этом практически не меняется

Согласно качественной модели получившей название капиллярно-фильтрационной, обессоливание водных растворов электролитов обратным осмосом – это не что иное, как дегитратация ионов, т е отбор через мембрану воды, наименее прочно связанной с ионами веществ, растворенных в разделяемом растворе Исходя из этой модели, явление прямого осмоса можно представить следующим образом При разграничении воды и водного раствора гидрофильной полупроницаемой мембраной на поверхности и внутри мембраны образуется слой связанной воды Тепловое движение ионов солей в растворе приводит к тому, что они захватывают воду у поверхности мембраны, включая ее в свои гидратные оболочки, и переносят ее в объем раствора, где вода перераспределяется между основными ионами Уменьшение концентрации воды на поверхности мембраны, обращенной к раствору, компенсируется переходом чистой воды через мембрану Переход воды, обусловленный работой подобного "гидратного насоса", происходит до тех пор, пока силы, определяемые притяжением воды к ионам, не будут уравновешены силами гидростатического давления со стороны раствора

Работа "гидратного насоса" интенсифицируется с увеличением содержания ионов в растворе и ростом температуры, что, по-видимому, и приводит к кажущейся аналогии между уравнением Вант-Гоффа и выражением для расчета осмотического давления Капиллярно-фильтрационная модель механизма селективной проницаемости позволяет объяснить влияние внешних факторов на процесс разделения электролитов и водных растворов органических веществ и получить некоторые расчетные зависимости для определения основных характеристик процесса Так, учет влияния концентрации электролита в исходном растворе на эффективность разделения обратным осмосом может быть проведен на основе представлений об определяющем влиянии гидратирующей способности ионов Согласно этим представлениям, чем выше гидратирующая способность ионов электролитов, тем крупнее и прочнее гидратная оболочка ионов, что, в свою очередь, затрудняет их переход через мембрану Поэтому в случае разбавленных растворов, в которых прочность связи ион–вода меняется незначительно, селективность мембраны остается практически постоянной С увеличением концентрации электролита эта связь ослабевает, и селективность мембраны снижается

Сравнительная оценка достоверности энергетической и капиллярно-фильтрационной моделей полупроницаемости была выполнена при исследованиях очистки сульфатных стоков целлюлозных заводов с применением динамических мембран на основе графитовых трубок (о динамических мембранах см разд. 10 3 2).

Из рис 10 2, где представлена температурная зависимость селективности динамической мембраны, можно видеть, что при повышении тем-

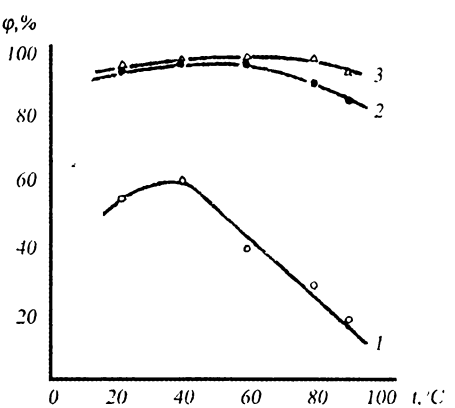


Рис 10 2 Зависимость селективности (φ) динамической мембраны ДЗТ от температуры разделяемого щелока

P 19,6 10^5 Па, концентрация сульфатного щелока 299 мг Na^+/л, *1*- селективность по Na^+, *2*- селективность по окисляемости *3*- селективность по цветности

пературы разделяемого раствора с 20 до 40 °С наблюдается повышение степени очистки воды от растворенных органических и неорганических веществ Дальнейшее повышение температуры до 60 °С вызывает снижение степени очистки воды от растворенных органических и неорганических веществ Дальнейшее повышение температуры до 60 °С вызывает снижение степени задержания ионов Na^+, т е минеральных компонентов сульфатного щелока Селективность по органическим веществам и лигниновым соединениям в этом интервале температур продолжает несколько повышаться В области температур 80-90 °С отмечается снижение степени очистки воды от органических веществ и лигниновых соединений, причем селективность мембраны по органическим веществам с молекулярной массой 500 – 10000, снижается в большей степени, чем селективность по лигнинам, молекулярная масса которых (20000 – 30000) значительно выше Проницаемость динамических мембран при повышении температуры возрастает обратно пропорционально вязкости фильтрата во всем изученном интервале температур

Из результатов экспериментов (рис 10 3) следует, что

$$G \cdot \mu_2 = A_1 = \text{const}, \; G \cdot \mu_в = A_2 = \text{const},$$

где G – проницаемость мембраны, μ_2 – вязкость фильтрата, $\mu_в$ – вязкость воды, $A_1 \approx A_2$ – константы проницаемости.

При расчетах зависимости проницаемости от температуры можно использовать как вязкость фильтрата, так и вязкость воды

Исходя из капиллярно-фильтрационной модели полупроницаемости Ю Дытнерского и теории связанной жидкости, разработанной Б Дерягиным и Н Чураевым с сотрудниками, полученные результаты можно объяснить следующим образом

На поверхности и внутри пор лиофильной мембраны, погруженной в раствор, возникает слой связанной воды, которая полностью или частично теряет растворяющую способность Если диаметр пор мембраны меньше суммы удвоенной толщины этого слоя и диаметра гидратированного иона или молекулы, то через такие поры будет проходить только вода, что и обусловливает селективность мембраны Повышение температуры разделяемого раствора с 20 до 40 °С понижает вязкость слоя связанной воды, что приводит к возрастанию потока воды, проходящего через поры мембраны, и селективность мембраны повышается При дальнейшем росте температуры в интервале от 40 до 80° С происходит уменьшение толщины слоя связанной воды, и при 65 – 80 °С этот слой разрушается, при этом селективность мембраны уменьшается, причем чем меньше диаметр гидратированного иона или молекулы, тем ниже температура, начиная с которой селективность будет уменьшаться, и тем больше степень этого уменьшения Поскольку при очистке сточных вод фильтрат образуется в

результате вязкого течения в порах мембраны растворителя (воды), то физико-химические свойства фильтрата и воды, в том числе и вязкость этих жидкостей, достаточно близки, что видно из рис.10 3 Чем выше селективность мембраны, тем меньше отличается фильтрат от воды по своим характеристикам

Данные результаты выявили неадекватность энергетической модели полупроницаемости мембран, а именно невозможность интерпретировать экстремальный характер зависимости селективности мембран от температуры исходного раствора В соответствии с уравнением (10 2), с ростом температуры разделяемого раствора, селективность мембран должна увеличиваться, что противоречит экспериментальным данным (см рис 10 2)

Капиллярно-фильтрационная модель не только наиболее полно объясняет экспериментальные данные по разделению водных растворов электролитов и сточных вод, но и позволяет сформулировать требования, предъявляемые к материалу и структуре мембран

10.3. Мембраны для баромембранных процессов

В последнее время для осуществления баромембранных процессов применяют в основном *полимерные*, *динамические* и *неорганические* мембраны

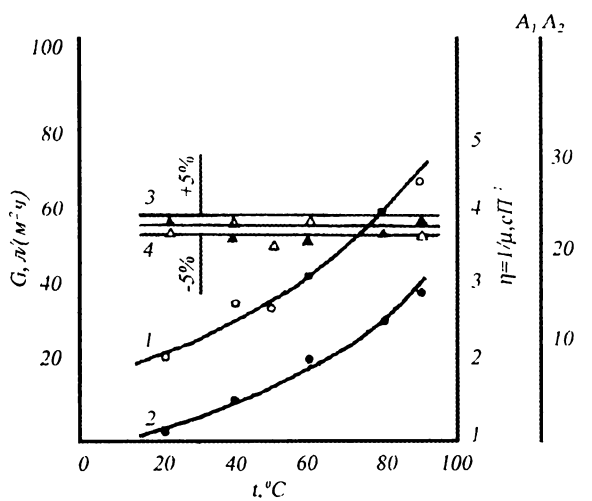


Рис 10 3 Влияние температуры на проницаемость *G(1)*, вязкость фильтрата *η(2)* и константы проницаемости $A_1(3)$ и $A_2(4)$
мембрана Д31 при P=19,6 10^5 Па, концентрация сульфатного щелока 299 мг Na^+ л, $A_1 \cdot G\ \eta_2$ 23 1..$i_2 \cdot G\ \eta_b$ 22 5

Требования, предъявляемые к мембранам различных типов, можно сформулировать в общем виде следующим образом

– высокая разделяющая способность (селективность φ, %),

– высокая удельная производительность [проницаемость G, л/(м·ч)],

– сопротивление температурным, химическим и бактериальным воздействиям среды,

– стабильность свойств мембраны (размер пор и др) в процессе эксплуатации,

– механическая прочность, отвечающая условиям эксплуатации, монтажа, транспортирования и хранения,

– длительный срок службы,

– невысокая стоимость

10.3.1. Полимерные мембраны

В настоящее время наибольшее практическое применение нашли полимерные мембраны на основе ацетатов целлюлозы (табл 10 2) Наряду с очевидными преимуществами эти мембраны имеют существенные недостатки необратимое ухудшение основных характеристик в щелочных и кислых средах, подверженность микробиологическому воздействию, малая механическая прочность, необходимость хранения и транспортирования во влажном состоянии, поскольку высушивание мембран приводит к необратимой потере проницаемости

Для сохранения первоначальных характеристик целлюлозных мембран при их длительном пребывании на воздухе (транспортировании, монтаже мембранных аппаратов и т д) можно замещать воду, содержащуюся в мембране, инертными органическими веществами с меньшей летучестью, чем у воды (например, глицерином)

Разработаны и выпускаются (г Владимир) мембраны на основе ароматических полиамидов типа УПМ, которые можно использовать для ультрафильтрации растворов с pH среды 1–13 и при температуре до 150°С В опытных масштабах выпускаются мембраны для микрофильтрации на основе хлорированного поливинилхлорида типа МФХП трех марок, предназначенных для очистки концентрированных неорганических растворов и щелочей Химическая стойкость некоторых полимерных мембран в различных органических растворителях приведена в табл 10 3

Полимерные мембраны подразделяются на два типа – *пористые* и *диффузионные* В зависимости от типа используемых баромембранных аппаратов как пористые, так и диффузионные мембраны изготовляют листовыми, трубчатыми либо в виде полых волокон внутренним диаметром 20–100 мкм при толщине стенки 10–50 мкм Мембраны можно изготов-

Таблица 10.2. Основные свойства мембран «ВЛАДИПОР» на основе производных целлюлозы

Марка	Пористость,%	Производительность при 20 °С по воде		Диаметр пор, мкм	Солезадержание %, не менее	Рабочий интервал pH
		л/м² сутки	мл/(см² мин)			
Мембраны для обратного осмоса*						
МГА 70	72 78	1000			70	4 7
МГА 80	72 78	600			80	4 7
МГА 90	72 78	350			90	4 7
МГА 95	72 78	250			95	4 7
МГА 100		100			97 5	4 7
МГЭ-70		500				1 14
МГЭ 80		250				1 14
МГЭ 90		180				1 14
Мембраны для ультрафильтрации**						
УАМ 50	72 78	30 130		До 0 005		4 7
УАМ-100	72 78	140 390		0 005-0 01		4 7
УАМ-150	72 78	400 790		0,01-0 015		4 7
УАМ-200	72 78	800-1400		0,015-0,02		4 7
УАМ-300	77-83	1600-3200		0,02-0 03		4 7
УАМ-500	77-83	4500-7000		0,03		4 7
УЭМ-100	68-72	29-58		0,0075-0 0125		1 14
УЭМ 200	68-72	72-140		0 0175-0,0225		1 14
УЭМ 300	70-74	160-360		0 0275-0,0325		1 14
УЭМ 500	72 76	430-580		0 0425-0 0475		1 14
Мембраны для микрофильтрации ***						
МФА МА №1	75 80		0 5-0 99	0 05-0 15		1 10
МФА МА №2	75 80		1 0-2 99	0 151 0 25		1 10
МФА-МА №3	75 80		3 0 5 99	0 251-0 35		1 10
МФА МА №4	77 83		6 0-9 99	0 351-0 45		1 10
МФА-МА №5	77 83		10 0 13 9	0 451 0 55		1 10
МФА МА №6	77 83		14 0 19 9	0 551-0 65		1 10
МФА МА №7	78 85		20 0 25 9	0 651 0 75		1 10
МФА МА №8	78 85		26 0 31 9	0 751 0 85		1 10
МФА МА №9	78 85		32 0-41 9	0 451 0 95		1 10
МФА-МА №10	78 83		42 0 55 0	0 951-1 05		1 10
МФА А №1	75 80		8 0 14 0	0 2		1 10
МФА-А №2	77 83		17 0-25 0	0 5		1 10
МФА-ЭМ №1	75 80		8 0 14 0	0 2		1 10
МФА-ЭМ №2	77 83		17 0 25 0	0 5		1 10
МФЦ №1	75-80		0 5-5 9			1 10
МФЦ №2	75 80		6 0-13 9			1 10
МФЦ №3	77 83		14 0-25 9			1 10
МФЦ №4	78 85		26 0 42 0			1 10
МФЭ №1			0 6 6 0			1 14
МФЭ №2			6 1 19 9			1 14
МФЭ №3						

* При 5 МПа ** При 0 15 МПа *** При 0.05 МПа

Таблица 10.3 Оценка химической стойкости (от 0 до 3) некоторых полимерных мембран в различных растворителях

Растворитель	Химическая стойкость мембран										
	триацетатцеллюлоза	нитроцеллюлоза	регенерированная целлюлоза	поливинилхлорид	нилон	поликарбонат (нуклеопоры)	ацетобутират целлюлозы	ацетилацетат целлюлозы	полибензимидазол	акрилонитрил	полиимиды
Спирты											
Метанол	3	0	3	3	0	3			3	3	3
Этанол	3	1	3	3	0	3			3	3	3
Пропанол	3	2	3	3	1				3	3	3
Бутанол	3	3	3	3	2				3	3	3
Кетоны											
Ацетон	1	0	3	1	2	3	0	0	3	3	3
Метилэтилкетон	0	0	3	1	2				3	3	3
Галогеносодержащие углеводороды											
Хлороформ	0	3	3	1	2	0	0		3	3	3
Метилен-хлорид	0	1	3	0	2		0	0	3	3	3
Четыреххлористый углерод	3	3	3	3	2		2		3	3	3
Трихлорэтилен	3	3	3	2	2		0		3	3	3
Ароматические углеводороды											
Бензол	3	3	3	1	2	2	0		3	3	3
Толуол	3	3	3	1	2				3	3	3
Кислоты											
Уксусная	0	0	3	1	3		1	1			
Соляная (5%)	1	1	2	3	0	3					
Серная (5%)	1	1	2	3	0	3				1	0
Азотная (5%)	1	1	2	3	0	3					
Основания											
NaOH (5%)	2	0	0	3	3	0					0
NH_4OH (5%)	2	2	3	3	3	0				1	

0 – мембрана растворяется, 1– взаимодействует с растворителем с нарушением структуры, 2 – набухает или становится неустойчивой, 3 – химически инертна

лять также на пористых носителях (подложках) различной конфигурации (так называемые композитные, или комбинированные мембраны)

Пористые мембраны

Нашли широкое применение в процессах обратного осмоса, микро- и ультрафильтрации Они могут иметь как анизотропную, так и изотропную структуру

Мембраны с анизотропной структурой имеют поверхностный тонкопористый слой толщиной 0,25-0,5 мкм (называемый активным, или селективным), представляющий собой селективный барьер Компоненты смеси разделяются именно в этом слое, располагаемом со стороны обрабатываемого раствора Крупнопористый слой толщиной около 100-200 мкм, находящийся под активным слоем, является подложкой, повышающей механическую прочность мембраны Мембраны с анизотропной структурой характеризуются высокой удельной производительностью, им не свойственна закупорка пор в процессе эксплуатации, срок службы этих мембран определяется главным образом химической стойкостью материала мембраны к воздействию перерабатываемых сред

Получают обычно эти мембраны из растворов полимеров с различными добавками в условиях, препятствующих уплотнению полимера вследствие действия капиллярных сил Для получения листовых (пленочных) полупроницаемых мембран применяют сухой (спонтанный), мокрый (коагуляционный) и термальный методы

Сухой метод. Полимер, например эфир (или смесь эфиров) целлюлозы, растворяют в растворителях типа ацетона и к этому раствору добавляют соответствующие порообразующие агенты (этанол, бутанол, воду, глицерин и др) Преимущества мембран, полученных сухим методом, - возможность их хранения и транспортирования в сухом виде

В процессе испарения растворителя повышается концентрация полимера в растворе, снижается скорость испарения растворителя, в результате чего на поверхности пленки образуется активный слой Пористость мембран можно регулировать, изменяя концентрацию и условия испарения растворов (например, температуру), а также вводя соли и другие вещества, растворимые в воде

Мокрый (коагуляционный) метод формования мембран, применительно к мембранам из ацетатов целлюлозы состоит в следующем Соотношение раствора [22,2:66,7:10,0:1,1% (масс)], состоящего из ацетата целлюлозы, смеси ацетона с водой и порообразователя (перхлорат магния, иногда формамид), наносят тонким слоем на стеклянную пластину, подсушивают несколько минут, затем образующуюся пленку вместе с пластиной погружают в холодную воду (около 0°С), в которой выдерживают в течение 1 ч до отслаивания пленки от пластины В начальной стадии формования аце-

тон быстро испаряется с поверхности раствора полимера, и на ней образуется гелеобразный слой, препятствующий удалению растворителя из более глубоких слоев раствора полимера В дальнейшем этот слой преобразуется в активный Толщина этого слоя тем меньше, чем больше продолжительность испарения растворителя

В момент погружения пластины в воду, являющуюся осадителем для данного раствора, система представляет собой желированную оболочку, в которой находится раствор При соприкосновении с водой гель затвердевает, в результате чего образуется поверхностный слой с очень узкими порами Раствор полимера, находящийся внутри оболочки, коагулирует медленнее, чем в ее поверхностном слое, так как диффузия воды через эти оболочки затруднена При этом водой вымывается как растворитель, так и порообразователь

При получении ацетатцеллюлозных мембран, а также мембран из растворов других полимеров в ацетоне во избежание слишком быстрого испарения растворителя (что может повлечь за собой разрушение структуры пленки) подсушку нередко проводят в атмосфере ацетона при комнатной температуре

Факторами, определяющими размер пор и общую пористость мембраны, являются состав раствора для полива, тип растворителя и порообразователя Чтобы уменьшить диаметр пор в полученной мембране, ее обрабатывают водой при температуре, близкой к температуре стеклования данного полимера (например, для ацетатов целлюлозы температура воды должна быть в пределах 85-89°С) При этом происходит некоторая усадка пористой структуры, что часто приводит к повышению селективности мембраны

Вода часто присутствует в поливочных растворах, являясь растворителем для «порообразующей соли» [$ZnCl_2$, $Mg(ClO_4)_2$, $MgCl_2$, NaCl и др] Так, мембраны из метакрилатных сополимеров галактозы, химически стойких к щелочам и кислотам, готовят из раствора, содержащего 20% полимера, 68% ацетона, 10% воды и 2% хлорида цинка Для получения листовых мембран смесь наносят тонким слоем на стеклянную пластину при комнатной температуре, пластину погружают в воду при температуре 15 °С, в которой пленка отделяется от стекла

Мембраны можно получать также из неводных растворов, при этом полимер и соль растворяют в смеси ацетона со спиртом, подсушивают для удаления более летучего ацетона и затем погружают в воду для вымывания солей и остатков растворителя

Термальный метод формования мембран заключается в термической желатинизации смеси полимера и соответствующих пластификаторов, например полигликолей Компоненты смешивают, расплавляют и охлаждают, получая так называемые термальные гели При этом растворяющая

способность пластификаторов, а следовательно и степень растворения полимера, изменяется с изменением температуры По мере снижения температуры расплава макромолекулы полимера взаимодействуют между собой, образуя гелеобразную структуру При этом в результате разделения фаз образуются поры Термальные гели очень хороши в качестве подложек в комбинированных (композитных) мембранах, так как могут иметь изотропную структуру, а собственно термическая желатинизация позволяет получить структуру полимерной пленки практически любой пористости

Термальный метод формования используют также, для получения мембран прессованием при повышенных температурах трехкомпонентных композиций, включающих в себя эфир целлюлозы (триацетат), пластификатор (тетраметиленсульфон, диметилсульфоксид и др) и порообразователь – полиол (три- или тетраэтиленгликоль) Для удаления добавок пленку, отпрессованную при 200 °С, промывают водой Полученные таким образом мембраны имеют улучшенные механические свойства и повышенную водопроницаемость.

Помимо трех основных методов получения пленочных мембран можно использовать также модифицирование промышленных полимерных пленок, например прививку веществ, содержащих гидрофильные группы В результате увеличения лиофильности полимера сорбция воды возрастает, и полимер может набухать до состояния геля

Для получения мембран в виде полых волокон применяют следующие методы: сухой, сухо-мокрый, мокрый и метод формования из расплава

Сухим методом полое волокно получают с помощью фильеры с последующим удалением растворителя на воздухе или в струе инертного газа Для образования сквозного канала в волокне используют фильеры с иглой, закрепленной в центре отверстия фильеры, или капилляр, через который под давлением подают газ

Сухо-мокрый метод отличается от сухого тем, что после удаления на воздухе растворителя из раствора полимер осаждают в воде или в каком-либо другом осадителе с последующим удалением растворителя и образованием активного слоя

При *мокром способе* полое волокно формуют в осадительную ванну, минуя стадию удаления растворителя на воздухе При этом внутрь полого волокна по игле или капилляру подают осадитель, обычно воду

При *формовании из расплава* используют расплав полимера с различными добавками По окончании формования через фильеру полое волокно обрабатывают так же, как при сухом или сухо-мокром методах Следует отметить, что фильеры для формования волокон из расплава наиболее просты по конструкции

Мембраны с изотропной структурой Для таких мембран характерно

быстрое снижение проницаемости вследствие закупорки пор коллоидными или взвешенными частицами, часто содержащимися в разделяемых растворах Эти полимерные мембраны получают облучением тонких полимерных пленок заряженными частицами или электромагнитным излучением с последующим травлением химическими реагентами, вследствие чего их называют ядерными мембранами, или «нуклеопорами»

За счет деструкции молекулярная масса полимера вдоль трека заряженной частицы становится значительно меньше, чем в радиационно неповрежденных местах, поэтому чувствительность области трека к химическому воздействию повышается Чтобы в результате химического травления образовались сквозные поры практически одинакового диаметра, следует применять излучение с высокой плотностью ионизации, в частности α-частицы и протоны Однако тяжелые заряженные частицы с высокой ионизирующей способностью (например, α-частицы с энергией 4-5 МэВ) имеют в полимере небольшой пробег, поэтому их целесообразно использовать для облучения тонких пленок (толщиной до 10-15 мкм)

Для увеличения деструкции материала в направлении вдоль трека целесообразно облучение частицами сочетать с дополнительным облучением ультрафиолетовым светом, рентгеновскими лучами, γ-лучами или электронами. При облучении ультрафиолетовым светом длина волны должна быть подобрана таким образом, чтобы наиболее сильно воздействовать на радиационно поврежденные места пленки Например, для пленок из поликарбоната оптимальная длина волны составляет 280-300 нм, при бóльших длинах волн эффект практически не достигается, а при меньших начинается сильное разрушение всей поверхности пленки

Когда большая заряженная частица (тяжелый положительно заряженный ион) проходит через вещество, она выбивает наружные электроны атомов в кристаллической решетке, образуя так называемый клин возбужденных ионов В области клина положительные ионы взаимно отталкиваются, в результате чего нарушается порядок решетки

Для большинства полимеров вероятным механизмом образования треков является разрыв химических связей Заряженные частицы ионизируют и «*возбуждают*» макромолекулы полимера, что приводит к разрыву цепей, концевые группы которых оказываются высокоактивными Поэтому в дальнейшем при погружении облученной пленки в кислоту или щелочь на месте треков образуются поры Образованные в результате выщелачивания поры имеют коническую форму, причем угол конуса Θ зависит от отношения (R) скорости выщелачивания по оси трека к скорости растворения необлученной полимерной пленки При больших значениях R угол конуса ($\Theta = 2/\mathrm{cosec}^{-1}R$) уменьшается, и форма образующихся пор приближается к цилиндрической

На структуру мембран значительное влияние оказывают следующие

факторы тип заряженной частицы, присутствие примесей в полимере, концентрация раствора, вид и длительность дополнительного облучения, частичный отжиг перед выщелачиванием, продолжительность химического травления При частичном отжиге и применении низко концентрированного травильного раствора получаются мембраны с порами малого диаметра

В настоящее время можно получать ядерные мембраны с порами диаметром от 4 нм до нескольких десятков микрометров Толщина этих мембран изменяется от одного до нескольких микрометров (обычно около 10 мкм)

На поверхности ядерных мембран имеются частично перекрытые (слившиеся) поры Поскольку точки, в которых ионы попадают на облучаемую пленку, распределяются по закону случайных чисел, то число таких перекрытий быстро возрастает с увеличением диаметра пор и дозы облучения Однако направления движения отдельных ионов в пучке практически никогда не бывают строго параллельными Поэтому даже в тех случаях, когда входные отверстия пор перекрываются, поры внутри пленки часто оказываются частично перекрытыми В результате ядерные мембраны даже с частично перекрытыми порами остаются высокоселективными.

Для изготовления ядерных мембран (нуклеопоры) в качестве источника излучения используют осколки ядерного деления, образующиеся при облучении тонкой урановой пластинки (^{235}U) потоком нейтронов из атомного реактора Эти осколки, обладая большими зарядом и массой, весьма эффективно воздействуют на полимерные материалы Однако деление ядер урана происходит несимметрично наряду с группой тяжелых осколков, заряд и масса которых близки к заряду и массе ксенона, образуется также группа значительно более легких осколков с меньшей деструктивной способностью Кроме того, каждая из этих групп имеет дисперсию по массе, заряду и величине кинетической энергии, следствием чего является довольно значительная дисперсия размеров пор в мембранах Поэтому мембраны, полученные с помощью пучка ионов ксенона, имеют заметно лучшие характеристики, чем мембраны, полученные с использованием заряженных осколков деления ядер

Весьма перспективно изготовление ядерных мембран с использованием анизотропных или двухслойных пленок с очень тонким поверхностным слоем (1 мкм или менее) В этом случае можно получить мембраны с порами очень малого диаметра (порядка десятков ангстрем), которые можно использовать в технологических процессах, основанных на обратном осмосе

В России выпускают ядерные мембраны для ультра- и микрофильтрации, изготовляемые на основе лавсановых пленок шириной 300 мм с по-

рами диаметром от 0,02 до 20 мкм

Преимущества ядерных мембран. отклонение диаметров пор от номинального значения не превышает 10%, правильная, практически круглая форма поперечного сечения пор; возможность получать мембраны с заранее заданным числом и диаметром пор, очень узкое распределение пор по диаметру, возможность использовать для их изготовления материалы, стойкие к агрессивным средам; они пассивны в биологическом отношении, не разрушаются бактериями и не обладают бактерицидными свойствами, их можно подвергать термической и химической обработке и др.

Свойства уплотняющихся (полимерных) мембран в значительной степени определяются их структурой, обусловленной химической природой, наличием заряженных частиц (на молекулярном уровне) и микрокристаллитной структурой (надмолекулярный уровень) – пористостью, размером пор, распределением пор по размерам, типом структурной ячейки и степенью ее асимметрии

Предполагается, что элементарными первичными надмолекулярными образованиями являются либо глобулы, либо «пачки» макромолекул с различной степенью упорядоченности макромолекул внутри «пачки» Структурные свойства полимерных мембран являются функцией многих параметров разветвленности и регулярности полимерной цепи, способа и режима получения мембраны, наличия пластификатора и стабилизатора и т д В процессе эксплуатации происходит изменение структуры уплотняющихся мембран. Все это определяет трудности, возникающие при проведении структурных исследований полимерных мембран, направленных на разработку эффективных методов улучшения их проницаемости, селективности и прочности

Изучение структурных свойств позволяет глубже исследовать механизм перемещения молекул разделяемой смеси через мембрану и их селективность Наиболее сложна структура анизотропных мембран Например, детальное изучение поперечного среза ацетатцеллюлозных мембран, нашедших наибольшее практическое применение, проведено с помощью электронного микроскопа

Для оценки проницаемости и селективности мембран важно знать степень кристалличности полимера, из которого они изготавливаются Кристалличностью определяются также различные параметры, характеризующие химические и механические свойства мембран Полимерные мембраны с высокой степенью кристалличности обычно менее проницаемы, чем мембраны с аморфной структурой. Зависимость проницаемости мембран от их структуры связана с линейной зависимостью между поглощением влаги и долей аморфной фазы в целлюлозе При гидролизном или микробном разложении полимерных мембран наиболее уязвимы аморфные области, которые разрушаются первыми Это явление используется

при экспериментальном определении доли аморфной фазы в полимере по кинетике гидролиза

Соотношение между кристаллической и аморфной фазами оказывает большое влияние на механические свойства полимерных мембран Отдельные кристаллиты являются очень жесткими, особенно в направлении их продольной оси, это препятствует сжатию полимерных мембран Аморфные же участки полимера, расположенные между кристаллитами, легко поддаются деформации Степень деформации их может сильно меняться с изменением температуры (ниже температуры стеклования $t_{ст}$ жесткость аморфной фазы может быть значительной), а также в присутствии пластификаторов

В полимерных мембранах существуют также так называемые паракристаллические области с переменной степенью кристалличности, которые, по сравнению с кристаллической и аморфной областями, обладают средним сопротивлением деформации

Кристалличность полимерных мембран определяется пространственным расположением составляющих их макромолекул и межмолекулярными силами Во многих случаях при быстром охлаждении расплава получается полностью аморфная пленка, которую можно закристаллизовать термообработкой при температуре выше температуры стеклования $t_{ст}$ Высококристалличный полимер можно получить также быстрым удалением растворителя из раствора путем испарения

Однако следует иметь в виду, что широко используемое в настоящее время понятие кристалличности не учитывает всех особенностей структуры мембран и является в известной степени условным Очевидно, по тем же причинам определение степени кристалличности различными методами (рентгенографически, ИК-спектроскопией, по плотности полимера или с использованием спектров ЯМР) часто не дает сопоставимых результатов Можно представить себе случай, когда две мембраны имеют одинаковую степень кристалличности в «пачках», но формирование структуры в одном случае остановилось на уровне «пачек», а в другом завершилось образованием сферолитов различных размеров Упорядоченность в первом случае меньшая, чем во втором, и свойства этих мембран должны быть различными

Диффузионные мембраны

Диффузионные мембраны обычно применяют для разделения газов, а также жидких смесей методом испарения через мембрану Диффузионные мембраны являются непористыми Они представляют собой квазигомогенные гели, через которые растворитель и растворенные вещества диффундируют под действием градиента концентраций (молекулярная диффузия) Скорость, с которой через мембрану проходят отдельные компоненты, зависит от энергии активации при взаимодействии переносимых

частиц с материалом мембраны, а также от подвижности отдельных звеньев мембранной матрицы и от свойств диффундирующих компонентов раствора Следует отметить, что скорость диффузии тем выше, чем слабее связаны между собой отдельные звенья полимерной цепи в гелевом слое, т е чем сильнее набухает мембрана Поэтому для изготовления диффузионных мембран наиболее приемлемы лиофильные материалы

Скорость прохождения молекул через диффузионную мембрану обычно прямо пропорциональна коэффициенту диффузии, который определяется размерами молекул и их формой. Поэтому диффузионные мембраны наиболее рационально применять для разделения компонентов, имеющих практически близкие свойства, но различающихся размерами и формой молекул Проницаемость диффузионных мембран почти не снижается со временем Они имеют большое гидродинамическое сопротивление, поэтому их следует применять в виде ультратонких пленок толщиной порядка 0,02-0,04 мкм, закрепленных на пористых подложках

10.3.2.Динамические мембраны

В реальных условиях в результате сорбции дисперсных частиц на поверхности мембраны (подложки), обращенной к раствору, образуется "дополнительный" полупроницаемый слой. Именно этим объясняется условность границ применения баромембранных процессов(табл 10 1) Это явление используется при создании еще одного вида полупроницаемых мембран – динамических.

Динамические мембраны получают фильтрованием раствора, содержащего специальные добавки диспергированных веществ, через пористые подложки Номинальный размер пор подложек от 5 нм до 5 мкм, так что они не способны задерживать молекулы и ионы растворенных низкомолекулярных веществ Однако в результате сорбции дисперсных частиц на поверхности подложки, обращенной к раствору, образуется полупроницаемый слой

Ряд особенностей динамических мембран обусловливает перспективность их применения в крупных установках – например, для очистки промышленных сточных вод Прежде всего, это простота изготовления аппаратов Если при использовании в качестве мембран полимерных пленок возникают определенные трудности (например, при размещении пленок на подложках, их закреплении, организации перетока между секциями и т п), то основная задача, которую приходится решать при создании аппаратов с динамическими мембранами, сводится к разработке способов крепления и герметизации в них пористых подложек При этом аппарат может быть выполнен, например, по типу кожухотрубчатого теплообменни-

ка, имеющего пористые трубки малого диаметра, что позволяет получить в единице объема большую поверхность мембран

Другое важнейшее достоинство динамических мембран – высокая удельная производительность, достигающая сотен литров на 1 $м^2$/ч, что превышает удельную производительность широко распространенных ацетатцеллюлозных мембран для обратного осмоса. Следует также отметить, что срок службы динамических мембран практически неограничен Мембраны остаются полупроницаемыми до тех пор, пока в разделяемом растворе имеются микроколичества дисперсного материала (0,1-10 мг на 1 л раствора) В случае механического повреждения динамической мембраны возможно ее самовосстановление в результате отложения на подложке нового полупроницаемого слоя Более того, если во время эксплуатации по каким-либо причинам ухудшатся характеристики мембраны, их можно восстановить, смыв сорбированный слой растворителем, подаваемым с обратной стороны подложки, а затем вновь восстановить мембрану

Результаты исследования показывают, что динамические мембраны можно эффективно использовать для очистки слабоминерализированных сточных и природных вод, концентрирования водных растворов Об этом же свидетельствуют длительные испытания аппарата с динамическими мембранами, образованными на пористых керамических трубках В исследованиях применяли предварительно умягченную природную воду Динамические мембраны были образованы с помощью дисперсных добавок гидроксида циркония и полиакриловой кислоты. При рабочем давлении около 7 МПа и скорости потока в трубках 5 м/с наблюдалась селективность по иону SO_4^{2-} до 99% и по иону Cl^- до 91% Производительность по очищенной воде достигала 15 $м^3$/сут и мало снижалась в процессе эксплуатации

Исследования динамических мембран, получаемых на пористых графитовых трубках с добавлением в растворы гидроксида железа, показали, что при обработке радиоактивных стоков активность снижается на 88%, в опытах по очистке сточных вод целлюлозно-бумажных производств селективность (по цветности) составляла 95,5-97,5% Таким образом установлена высокая эффективность применения динамических мембран для очистки воды от органических веществ и неорганических солей

Большой практический интерес представляют динамические мембраны, образованные одним или несколькими компонентами, содержащимися непосредственно в обрабатываемых растворах Подобный процесс, называемый самозадержанием, часто встречается при фильтрации через пористые подложки сточных вод, а также загрязненных природных вод Так, при пропускании через пористые керамические трубки бытовых сточных вод и воды из загрязненного озера химическое потребление кислорода (ХПК) в очищенной воде снижалось на 80-90%, а бактерии задерживались

практически полностью Для образования динамических мембран в качестве дисперсной добавки используют водоэкстрагируемую фракцию продуктов разложения растительных веществ, обычно присутствующих в природных водах

Установлено, что динамические мембраны с хорошими характеристиками получаются при обработке отходящих щелоков целлюлозно-бумажных производств Была изучена возможность получения самозадерживающих мембран при работе на сточных водах химических и целлюлозно-бумажных производств В качестве пористой основы использовали графитовые трубки наружным диаметром 8-12мм и толщиной стенки 2мм Следует отметить, что характеристики динамических мембран можно существенно улучшить, если в качестве пористой основы использовать специально приготовленные подложки с более равномерным распределением пор по размеру Известны случаи образования самозадерживающих динамических мембран невысокой селективности при работе на концентрированной серной кислоте, содержащей примеси арилсульфокислот

Одна из наиболее перспективных сфер применения динамических мембран – очистка сточных вод, загрязняющими компонентами которых являются катионы (особенно многовалентные) или коллоидные частицы Эти мембраны можно применять и для обработки природных кислых вод, когда не гребуется глубокое обессоливание При этом вода практически полностью очищается от микроорганизмов, коллоидных частиц, а содержание растворенных в ней веществ снижается примерно вдвое Во многих случаях вода после такой обработки становится пригодной для использования в промышленности и в быту

Динамические мембраны эффективны при очистке перед сбрасыванием в водоемы высокотоксичных сточных вод, содержащих растворенные вещества, которые легко переходят в коллоидную форму Исследования показали, что динамические мембраны задерживают ≈96% трехвалентных и ≈92% двухвалентных катионов при достаточно высокой проницаемости

Процесс образования динамических мембран Полупроницаемый слой, формирующийся на поверхности пористой подложки в результате сорбции диспергированных частиц, должен находиться в динамическом равновесии с раствором Равновесие достигается обычно через несколько часов (время зависит от концентрации раствора, добавки, величины pH, давления над раствором и т д) При достижении динамического равновесия селективность и проницаемость мембраны становятся постоянными Если прекратить добавление в раствор дисперсных частиц, селективность в течение нескольких часов падает до нуля, а проницаемость возрастает

Иногда для быстрого образования мембраны в раствор вводят повышенное количество добавки После установления постоянных характери-

стик разделения концентрацию добавки снижают до минимальной, требуемой для поддержания этих характеристик

Дисперсные добавки образуют с раствором суспензии или эмульсии, а иногда истинные растворы В качестве добавок обычно используют гидроксиды поливалентных металлов (например, Zr^{4+}, Th^{4+}, Fe^{3+}), высокомолекулярные соединения (например, поливинилпирролидон), полиэлектролиты (полисульфонаты, полиамины и т д), органические и неорганические иониты (бентонит и т п) Выбор той или иной добавки обусловлен природой растворенных веществ, их концентрацией, необходимой селективностью и рядом других факторов Следует отметить, что мембраны, образованные добавками, несущими электрический заряд, могут подвергаться неблагоприятному воздействию поливалентных противоионов Кроме того, с повышением концентрации растворенных веществ селективность мембраны быстро уменьшается Нейтральные мембраны не имеют этих недостатков, однако характеристики разделения у них хуже, чем у заряженных мембран

Предпринимаются попытки сочетать положительные свойства различных добавок Например, высокоэффективные мембраны получены комбинированием добавок гидроксида циркония и полиакриловой кислоты, а также осаждением слабых полиэлектролитов на подложках с последующим переводом их в нейтральную форму путем изменения pH раствора

Концентрация добавки, которая требуется для образования динамической мембраны, зависит от природы добавки, типа раствора и условий проведения процесса разделения

С увеличением концентрации добавки первоначально снижается проницаемость и возрастает селективность динамической мембраны, что можно объяснить повышением толщины равновесного сорбированного слоя Затем эти характеристики достигают экстремальных значений и в определенном интервале концентраций добавки остаются постоянными При последующем увеличении концентрации добавки селективность и проницаемость могут снизиться из-за существенного повышения общего содержания ионов в растворе .

Пористые подложки Материал и форма подложки не оказывают заметного влияния на характеристики динамических мембран Успешно применяются пористые графитовые, стеклянные, фарфоровые и металлические трубки и пластины, полимерные мембраны для ультрафильтрации и т п

Экспериментально найдено, что диаметр пор в подложках, при котором непосредственно на них могут образовываться динамические мембраны, достигает 3-5 мкм При использовании подложек с более крупными порами рекомендуется метод забивки пор Он заключается в продавливании через подложки с порами диаметром 5-50 мкм разбавленной суспензии.

содержащей частицы произвольной формы размером 0,01-100 мкм из любого материала, инертного к раствору (диатомитовые земли, перлит, асбестовые и целлюлозные волокна, селикагель, графит и т п) В результате на подложке образуется слой частиц, который не обладает селективным действием, но представляет собой хорошую основу для последующего образования динамических мембран

Влияние pH Характеристики динамических мембран в значительной степени зависят от pH обрабатываемых растворов При изменении pH меняется ионообменная способность заряженных динамических мембран, что отражается на степени задержания различных ионов Например, у мембран, образованных полиакриловой кислотой, селективность по NaCl и Na_2SO_4 в щелочной среде значительно больше, чем по $MgCl_2$, поскольку Mg^{2+} является многовалентным противоионом В кислой среде мембрана переходит в нейтральную форму, и наблюдается противоположная картина Влияние pH существенно и потому, что большинство мембранообразующих добавок представляет собой коллоидные системы, в которых изменение размера коллоидных частиц, их растворение или коагуляция зависят от pH

Электрическое поле Исследования показали, что характеристики динамических мембран, а также продолжительность их образования в значительной степени зависят от величины и знака заряда слоя, сорбируемого на подложке В связи с этим естественно было бы предположить, что внешним зарядом можно воздействовать на эти характеристики и изменять их в требуемом направлении Для проверки этого предположения были проведены эксперименты, в которых в качестве подложки использовали мембрану для ультрафильтрации из ацетата целлюлозы с порами средним диаметром 7,5 мкм, водный 0,02 *М* раствор $CaCl_2$ при pH 3,1 и рабочем давлении равным 0,3 МПа Концентрация (дисперсная добавка) $Fe(OH)_3$ составляла $3 \cdot 10^{-3}$ *М*

При подведении внешнего отрицательного заряда характер кривых проницаемости [$G = f(\tau)$] и селективности [$\varphi = f(\tau)$] в основном аналогичен тому, который наблюдался в опытах без заряда, но селективный слой на подложке образуется примерно в 10 раз быстрее (через 30-40 минут вместо 6-10 часов) Это объясняется значительным увеличением скорости адсорбции коллоидных частиц на поверхности подложки В то же время вследствие большой толщины равновесного сорбированного слоя проницаемость несколько ниже, чем у мембраны, образованной без наложения электрического поля После отключения внешнего источника тока проницаемость увеличивалась и примерно через 2 часа достигала постоянного значения, соответствующего проницаемости мембраны без подвода заряда Интересно отметить, что при прекращении подачи дисперсной добавки в разделяемую систему на подложке, к которой подведен отрицательный

заряд, сорбированный слой разрушается значительно медленнее, и при этом динамическая мембрана может работать в течение нескольких суток без ухудшения селективных свойств

При подводе к подложке положительного заряда динамическая мембрана примерно через 30 минут утрачивала селективные свойства вследствие полной десорбции коллоидных частиц с поверхности подложки

Из изложенного следует, что подведение внешнего заряда позволяет значительно ускорить процесс образования динамических мембран, стабилизировать их работу без подачи дисперсных добавок, восстанавливать первоначальную структуру подложки

10.3.3. Неорганические мембраны

В настоящее время для проведения процессов микро- и ультрафильтрации используются, главным образом неорганические мембраны, а среди них – мембраны на основе углерода и, особенно, керамики Производство мембран из керамики является экологически более чистым по сравнению с производством углеродных мембран, в связи с чем именно керамические мембраны получили наибольшее распространение

Технология изготовления неорганических мембран состоит из двух стадий На первой стадии формируется крупнопористая подложка, на второй стадии на эту подложку наносится мембранный слой

Технология изготовления керамических мембран. Трубчатые керамические подложки требуемого диаметра и длины можно отформовать только методом экструзии, при котором масса в обычном случае пластифицируется добавлением 30-50% глинистых материалов Однако введение в рецептуру большого количества глинистых материалов приводит к образованию малопроницаемых структур с закрытой пористостью, что в данном случае недопустимо Керамика с высокой пористостью без применения специальных методов поризации может быть получена из узкофракционированных порошков Помимо обеспечения механической прочности мембраны, керамическая подложка должна пропускать фильтруемый поток жидкости Следовательно, она должна быть высокопроницаемой пористой и одновременно достаточно тонкой Для придания керамическим массам необходимой вязкости и пластичности в качестве временных технологических связок применяют различные высокомолекулярные соединения (поливиниловый спирт, карбоксиметилцеллюлозу, глицерин и др) В качестве наполнителя, для получения керамических подложек, можно использовать микрошлифпорошки электрокорунда марок М24А, М20 или М14, а для придания массам пластичности – глину (ВГО) Веселовского месторождения Понизить температуру обжига подложек можно, вводя в состав масс оксиды бора, титана, магния, а также применяя этилсиликат-

ные и оксихлоридные связующие или датолитовый концентрат (ДК), который является борсодержащим материалом Были изготовлены образцы и опытные партии подложек, которые прошли различные испытания и использовались для нанесения мембранных слоев В табл 10 4 представлены составы и основные физико-технические свойства образцов керамических подложек

Образцы, полученные из масс №1 и №2 , имели более низкую пористость и воздухопроницаемость, чем образцы № 3 и № 4. При этом масса № 4 оказалась малопластичной, и образцы из нее формовались с большим трудом, а брак после стадии прессования составлял не менее 25%, что

Таблица 10 4. Керамические подложки (составы ,физико-технические характеристики)

Масса (состав)	Содержание основных компонентов, % (масс)			Физико-технические показатели		
	М 20	В Г О	ДК	пористость открытая, %	диаметр пор, мкм	воздухопроницаемость, $м^3/(м^2 с)$
№ 1	78	17	5	46,0	5 – 8	0,03
№ 2	82	14	4	47,2	5 – 8	0,05
№ 3	86	11	3	48,4	5 – 8	0,08
№ 4	90	8	2	49,8	5 – 8	0,1

объясняется низким содержанием глины (см табл 10 4) Подобных явлений не наблюдалось при испытаниях массы № 3 , которая характеризовалась высокой пластичностью; образцы из нее формовались легко Из этого можно заключить, что содержание ВГО в массе должно составлять не менее 10%. На пористость подложек это практически не влияет, но снижается количество брака (меньше подложек с короблением и растрескиванием) Для промышленного выпуска подложек и мембран использовались массы №2 и № 3, высушенные образцы обжигали при температуре 1250-1300°С

Состав указанных масс в дальнейшем был несколько откорректирован Вместо М20 в качестве наполнителя использовали смесь порошков М10 и М14 , изменили количество технологических связующих, влажность массы, режим прессования и конструкцию фильеры Это позволило освоить выпуск подложек с более тонкой стенкой, уменьшить диаметр подложки и сузить разброс пор, а открытую пористость сохранить в приемлемом диапазоне на уровне 42-44%. Размеры пор и меньший их разброс (в интервале 3–5 мкм) обеспечивают повышение качества нанесенного мембранного слоя

Расчеты и эксплуатационные испытания показали (табл 10 5), что трубчатые керамические фильтрующие элементы (ТКФЭ) с диаметром 8 мм более экономичны При их изготовлении из 1 т формовочной массы мож-

но получить мембранную поверхность в 1,8 раза бóльшую, чем при производстве ТКФЭ с диаметром фильтрующих элементов10 мм Кроме того, при использовании ТКФЭ с диаметром 8 мм удается в полтора раза повысить плотность упаковки мембран в типовом трубчатом аппарате и, соответственно, во столько же раз увеличить производительность отдельного аппарата и мембранной установки в целом Поэтому в настоящее время подложки длиной 800 мм, диаметром 8 мм, толщиной стенки 1 мм, диаметром пор 3-5 мкм и с открытой пористостью 42-44 % являются основным типом подложек для нанесения мембранных слоев

Таблица 10 5 Технические показатели подложек различного диаметра

Диаметр ГКФ'Э Мм	Масса ТКФ'Э длиной 800 мм. г	Число ТКФ'Э в аппарате, шт	Масса мембран в аппарате, кг	Число ТКФ'Э в 1 м^2, шт	Получено из 1 т сырья		
					число ТКФЭ, шт	фильтрующая поверхность, м^2	число аппаратов шт
10×1 5	80.0	40	3,2	40	12500	312	312
8×1.5	52.7	65	3,42	50	19070	380	293
8×1.0	39.0	65	2.53	50	27840	550	428
6×1.0	28.0	115	3.22	66	35700	540	310

Технологию нанесения мембранного покрытия (слоя) на керамическую подложку можно разделить на пять стадий 1)изготовление суспензии, 2)контакт суспензии и пористой поверхности подложки в течение фиксированного периода времени; 3)упрочнение осадка за счет поглощения остаточной жидкости пористой подложки и потока воздуха, проходящего через осадок и подложку, 4)сушка на воздухе; 5)обжиг при температуре около 1250 °С

Мембранное покрытие на подложку наносили погружением образца в керамический шликер различного состава и концентрации Шликеры (тонкомолотые суспензии) для нанесения промежуточного и фильтрующего слоев готовили с помощью шаровой мельницы, где твердые частицы шликера измельчали до 0,6-0,9 м^2/г и 1,5-1,8 м^2/г соответственно Оптимальный состав твердой фазы (%)

Глинозем или электрокорунд	80-90
Глинистый компонент (например, ВГО)	5-15
Диатолитовый концентрат	2-10
Глицерин (сверх 100%)	5-10

Технология нанесения мембранного покрытия

Трубчатые подложки герметизируют с одного конца, а на другом создают разрежение от 0,015 до 0,07 МПа При этом обеспечивается необходимая скорость нарастания промежуточного слоя и его сушки потоком воздуха, а также высокое качество мембранного покрытия Время образования промежуточного слоя составляет от 2 до 10 с, содержание твердой фазы в суспензии – от 3 до 10%

После нанесения промежуточного слоя подложку опускают в суспензию с фильтрующим слоем, выдерживают 2-10 с, сушат под вакуумом в воздушной среде 5-10 с, затем при 20-70°С сушат на деревянных поддонах в воздушной среде в продолжение 24-48 ч и обжигают при 1250°С Содержание твердой фазы в суспензии фильтрующего слоя составляет от 20 до 30% Результаты очистки сульфитных стоков с использованием керамических мембран диаметром 8×1 мм и размером пор 0,1-0,3 мкм приведены в табл 10 6

Таблица 10 6 Результаты очистки сульфитных стоков с использованием керамических мембран

Мембрана, номер	Рабочее давление $P \cdot 10^{-5}$, Па	Селективность φ, %		Проницаемость G, л / (м^2·ч)
		по сухому остатку	по Mg^{2+}-ионам	
1	3	63,1	51,8	24,4
	4	62,0	51,8	131
	4,5	62,5	55,2	162,0
	5	61,4	45,0	220,2
2	3	66,2	48,4	19,2
	4	62,6	41,0	78,0
	4,5	62,2	55,2	142,0
	5	62,2	51,8	194,0

Примечание Исходный раствор t = 20 °С , сухой остаток – 9,04% (масс), ионы Mg^{2+} – 0,19% (масс)

Сравнительный анализ результатов испытаний керамических мембран и графитовых трубок показал, что они обеспечивают практически одинаковую степень очистки стоков по минеральным компонентам (ионам Na^+ или Mg^{2+}) Однако проницаемость керамических мембран существенно выше, чем у полимерных и динамических мембран на основе графитовых трубок Так, проницаемость полимерных мембран и графитовых трубок в зависимости от условий проведения экспериментов (рабочего давления, температуры, концентрации растворенных веществ и т д) колебалась от 6 до 70 л/(м^2 ч), а проницаемость керамических мембран даже при более

низких значениях рабочего давления и температуры составляла от 20 до 220 л/(м^2·ч) Из этого следует, что использование керамических мембран обеспечивает более высокие технико-экономические показатели работы мембранных установок, чем применение полимерных мембран и графитовых трубок

По сравнению с полимерными мембранами керамические мембраны (производство которых было создано в РХТУ им Д И Менделеева), имеют значительные преимущества, а именно им свойственна высокая механическая прочность (в том числе к воздействию абразивных частиц) и устойчивость к воздействию бактерий, регенерация мембран может проводиться обратным потоком фильтрата (жидкости), обратным потоком газа (воздуха), химическим и термическим методом, керамические мембраны выдерживают высокие рабочие температуры; они устойчивы в химически агрессивных средах практически при любых значениях pH среды, а также в различных растворителях

Эти преимущества и возможность создания компактных и эффективных аппаратов на основе керамических мембран открывают новые области применения баромембранных методов разделения, некоторые из них рассмотрены ниже

10.4. Аппараты и установки для баромембранных процессов

Эффективность и экономичность работы любой установки обратного осмоса или ультрафильтрации в значительной степени зависят от характеристик ее основного элемента – мембранного аппарата Поэтому к аппаратам промышленных масштабов предъявляется ряд требований, определяемых условиями их эксплуатации и изготовления

Промышленные аппараты для проведения мембранных процессов должны иметь большую рабочую поверхность мембран на единицу объема, быть простыми в сборке и монтаже Жидкость должна равномерно распределяться над мембранной поверхностью и иметь достаточно большую скорость течения для снижения концентрационной поляризации Перепад давления в аппарате должен быть по возможности минимальным Кроме того, для работы при повышенных давлениях необходимо обеспечение механической прочности и герметичности аппарата

В настоящее время получили распространение аппараты четырех типов с многокамерной укладкой мембран, с трубчатыми фильтрующими элементами, со спиральными фильтрующими элементами, с мембранами в виде полых волокон

Ниже рассматриваются аппараты с мембранами в виде полых волокон и с трубчатыми фильтрующими элементами, которые в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к мембранам (см разд 10 3)

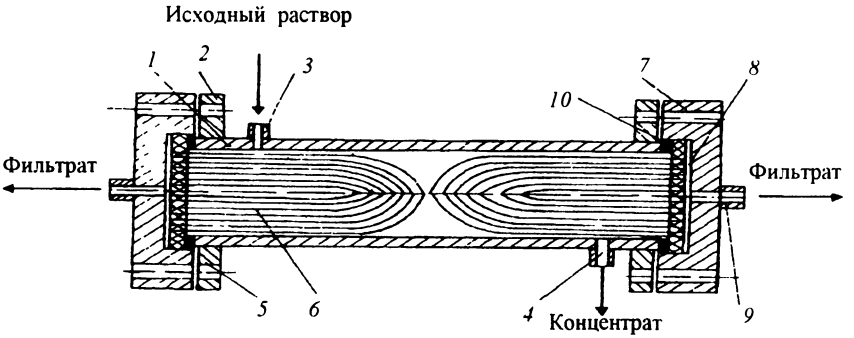


Рис 10 4 Аппарат для обратного осмоса с полыми волокнами

1 корпус аппарата, *2* – фланцы, *3* – штуцер для подачи раствора, *4* штуцер для отвода концентрата *5* шайба, *6* – полые волокна, *7* – пористая подложка, *8* – торцевые фланцы, *9* – штуцер для отвода фильтрата, *9* уплотнения

Аппараты с полыми волокнами. Одна из конструкций аппарата с полыми волокнами представлена на рис 10 4

Аппарат состоит из корпуса *1*, снабженного фланцами *2* и штуцерами *3* и *4* для подачи исходного раствора и отвода концентрата Шайба *5*, в которой закреплены открытые концы полых волокон 6, и пористая подложка *7*, необходимая для отвода фильтрата, уложена на дно торцевого фланца *8*, имеющего штуцер *9* для отвода фильтрата Герметичность аппарата обеспечивается резиновыми уплотнениями *10* Для изготовления фильтрующих элементов аппарата используются полые волокна с наружным диаметром 100-200 мкм

Аппарат работает следующим образом Исходный раствор через штуцер *3* поступает в корпус аппарата *1* и движется между волокнами Под давлением часть раствора (фильтрат) проникает через поры внутрь волокон, а затем с помощью пористой подложки *7* через штуцер *9* отводится из аппарата Концентрированный раствор выходит из аппарата по штуцеру *4*

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются аппараты с полыми волокнами производительностью по воде Q_0=0,5 м^3/ч и селективностью (φ) по стандартному (0,15% NaCl) раствору 91~92%

Аппараты с U-образными волокнами нашли широкое распространение в промышленных установках не только для очистки жидкостей, но и для разделения газовых смесей

Аппараты с неорганическими мембранами. Характерными недостатками известных конструкций трубчатых аппаратов с неорганическими мембранами являются невысокая плотность упаковки мембран, сложная система герметизации фильтрующих элементов, и их высокая стоимость, а также сложность замены вышедших из строя мембран

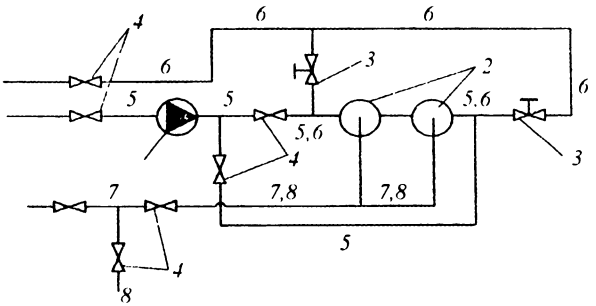


Рис 10 5 Схема установки с керамическими мембранами

1 насос *2* аппарат (элемент) устройства, *3* регулирующая арматура, *4* запорная арматура *5* трубопровод исходной жидкости, *6* трубопровод концентрата, *7* трубопровод фильтрата (пермеата), *8* трубопровод подачи газа или жидкости для обратной продувки или промывки

С целью устранения указанных недостатков была разработана установка (устройство) для разделения и очистки жидкости, схема которой представлена на рис 10 5, и аппарат для фильтрации с неорганическими мембранами (рис 10 6)

В состав схемы установки (рис 10 5) входят насос *1*, система аппаратов *2* (не менее одного), регулирующая *3* и запорная *4* арматуры, трубопроводы исходной жидкости *5*, концентрата *6*, фильтрата *7*, обратной продувки или промывки *8* Газ или жидкость обратной продувки могут обеспечить возврат концентрированного раствора к месту подачи в устройство исходного раствора и возвратно-поступательное движение жидкости как во всем устройстве, так и в его отдельных элементах Смена направления движения и периодичность обратной промывки или продувки зависят от физико-химических свойств разделяемой жидкости

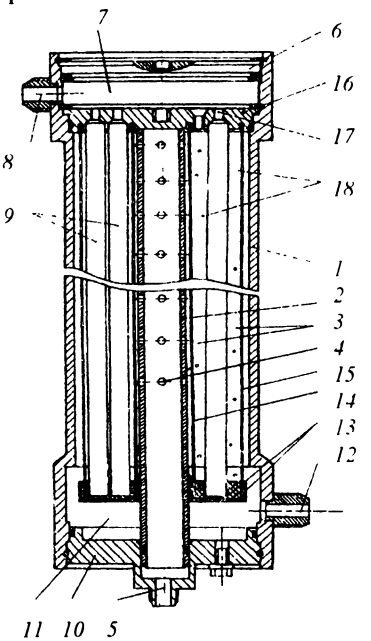
В корпусе *1* (рис 10 6) аппарата расположена центральная труба *2*, внутренняя полость которой сообщается с центральной полостью *3* корпуса *1* посредством выполненных в стенках трубы *2* сквозных отверстий или прорезей *4* переменного сечения с другой стороны посредством патрубка *5* центральная труба *2* соединена с трубопроводом исходной жидкости *5* или концентрата *6* (рис 10 5)

Число отверстий или прорезей и их сечение уменьшаются по мере движения жидкости из верхней части аппарата в нижнюю В верхней части аппарата под крышкой *6* выполнена полость *7*, которая имеет бо́льшее сечение, чем центральная полость *3* и сообщается с одной стороны посредством патрубка *8* с полостью трубопровода фильтрата (рис 10 5), с другой стороны – с полостями мембранных элементов *9* Под крышкой *10* в нижней части аппарата имеется нижняя полость *11*, которая сообщается с одной стороны посредством патрубка *12* с полостью трубопровода исходной жидкости или концентрата (рис 10 5), с другой стороны – с центральной полостью *3* корпуса *1*, которая имеет меньшее сечение, чем полость *11* нижней крышки *10* аппарата

Между верхней *6* и нижней *10* крышками аппарата аксиально расположены мембранные элементы *9* с наружным фильтрующим слоем, нижний конец которых заглушен в кольцевой чашке *13*, где одновременно с фильтрующими элементами закреплены и дренажные устройства *14* и *15*

Верхний конец мембранных элементов *9*, центральная труба *2* и дренажные устройства *14* и *15* герметично закреплены в трубной решетке *16*, в которой выполнены гнезда и соосно с ними резьбовые отверстия *17*, обеспечивающие отключение дефектного мембранного элемента *9* и сообщение с полостью *7*. В корпусе *1* между мембранными элементами *9* загружены твердые неорганические или полимерные частицы *18*. Это позволяет интенсивно перемешивать разделяемую жидкость и очищать поверхность мембранных элементов во время работы установки, что повышает производительность мембран в целом в 1,5-5 раз.

Рис. 10.6. Аппарат с неорганическими мембранами



Установка мембранного разделения работает следующим образом.

Исходная жидкость (рис. 10.5) с помощью насоса *1* поступает в аппарат *2*, при этом возможны два варианта движения жидкости. При поступательном (условно) движении исходная жидкость по патрубку *12* (рис. 10.6) поступает в полость *11*, затем в центральную полость *3* корпуса *1* и движется между мембранными элементами *9*. Часть жидкости под действием давления проходит внутрь мембранных элементов *9*, поступает в полость *7*, затем через патрубок *8* в трубопровод фильтрата (рис. 10.5). Другая часть исходной жидкости через отверстия или прорези *4* попадает в центральную трубу *2* и в виде концентрата через патрубок *5* поступает в следующий аппарат установки или трубопровод концентрата *6* (рис. 10.5). При возвратном движении жидкости в установке, которое обеспечивается переключением регулирующей *3* и запорной *4* арматуры, поступление и прохождение разделяемой жидкости в аппарате происходит в порядке, обратном описанному выше, а движение фильтрата – в том же порядке.

При регенерации мембран отключается или снижается давление подачи исходной жидкости насосом *1*, открывается запорная арматура *8*, подается газ или промывная жидкость в трубопровод фильтрата *7* (рис. 10.5), затем через патрубок *8* (рис. 10.6) – в

верхнюю полость 7 аппарата и внутрь мембранных элементов 9 Под воздействием давления газ или промывная жидкость проходят через поры мембранных элементов и дополнительно, наряду с твердыми частицами 18, очищает внешнюю (фильтрующую) поверхность мембранных элементов

Отметим, что возвратно-поступательное движение исходной жидкости, наличие твердых частиц, дренажей и отверстий или прорезей в центральной трубе в совокупности обеспечивают высокую эффективность работы аппаратов и мембранной установки (в 1,5-5 раз выше по сравнению с известными установками, у которых отсутствуют указанные элементы конструкции) Сочетание трубной решетки с гнездами и отверстиями центральной трубной решетки, наружного фильтрационного слоя мембранных элементов, кольцевой чашки с заглушенными концами элементов обеспечивает простоту сборки, эксплуатации и устранение дефектности мембранного элемента, что выгодно отличает данную конструкцию от других конструкций аппаратов с трубчатыми фильтрующими элементами Такая ремонтоспособность устройства делает его более дешевым и конкурентоспособным по сравнению с другими устройствами

Основные конструктивные решения рассмотренного аппарата были использованы при разработке установок для регенерации масел и очистки сточных вод от нефтепродуктов, выполненной РХТУ им Д И Менделеева совместно с ВНПО «Вторнефтепродукт» (например, была создана типовая установка УМРС-100 для очистки стоков нефтебаз и автозаправочных станций)

10.5. Очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий

10.5.1. Общая характеристика стоков и основные методы их очистки

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) – один из главных потребителей свежей воды Расход воды на выработку тонны бумаги, включая производство полуфабрикатов, колеблется в пределах 100-15000 м ^{3} Следует отметить, что производство целлюлозы и бумаги отличается от других отраслей промышленности высокой насыщенностью сточных вод минеральными и органическими веществами только в процесе получения тонны волокнистого сырья в раствор переходит от 37 до 1708 кг органических веществ, которые при отсутствии системы очистки сточных вод попадают в водоемы Сточные воды целлюлозных заводов содержат также взвешенное волокно, которое попадает туда, например, при сортировке целлюлозы и при многократных процесах разбавления и сгущения

Особое место в стоках сульфатно-целлюлозного производства занимают конденсаты выпарного и варочного цехов, в которых почти нет мине-

ральных и взвешенных веществ, но содержится значительное количество фенолов и сернистых соединений, вследствие чего эти стоки являются наиболее токсичными, с высоким показателем биологического потребления кислорода (БПК)

Такое разнообразие сточных вод по видам загрязнений и их концентрациям вызвало необходимость создания сложных и многостадийных схем очистки воды

Внутрицеховые системы очистки с помощью ловушек и фильтров позволяют очищать стоки в основном от взвешенных веществ Остальная часть загрязнений поступает на общезаводские очистные сооружения, которые снабжены оборудованием для механической, биологической и химической очистки Методами механической очистки (отстаивание, фильтрация, флотация) удаляются, в основном, взвешенные вещества, причем на контактных осветлителях эффект очистки составляет 98-99% Биологическая очистка, осуществляемая в аэротенках, позволяет снизить $БПК_5$ на 88-90%. Применение химической очистки после биологической уменьшает цветность воды с 2000-2500 градусов по платиново-кобальтовой шкале (ПКШ) до 50-100 градусов, а $БПК_5$ – с 10-25 мг O_2/л до 3-5 мг O_2/л Однако при химической очистке образуются большие количества осадка, обезвоживание которого представляет определенную трудность Кроме того, метод химической очистки стоков требует больших капитальных и эксплуатационных затрат, а применяемые реагенты, например $Al_2(SO_4)_3$, дороги и дефецитны

Хотя очистка сточных вод целлюлозно-бумажных заводов осуществляется в несколько стадий, качество очищенной воды не соответствует нормам для повторного использования ее в производстве (ХПК <12 мг O_2/л, $БПК_5$ < 5 мг O_2/л, цветность <80 градусов по ПКШ) Поэтому в настоящее время все российские предприятия целлюлозно-бумажной промышленности работают с забором свежей воды, в их числе и Байкальский целлюлозный завод, оснащенный наиболее совершенными очистными сооружениями

В связи с постоянным ростом водопотребления во многих странах мира все настойчивее выдвигаются предложения рассматривать потребляемую воду как общенациональное благо, имеющее стоимостное выражение, и включать расходы на водопотребление непосредственно в производственные издержки, отражающиеся на стоимости продукции В то же время наблюдается тенденция к усилению контроля за очисткой сбрасываемых стоков путем разработки определенных норм сброса и законодательных актов Учеными разных стран проводятся работы как по усовершенствованию действующих методов очистки, так и по разработке новых, все более эффективных физико-химических методов обработки стоков, среди которых мембранным процессам отводится одно из ведущих мест

10.5.2. Применение мембранных установок в целлюлозно-бумажной промышленности

Воду, очищенную с помощью мембранных процессов, можно использовать в замкнутых схемах производства В качестве мембран для проведения процессов обратного осмоса и ультрафильтрации применяют различные полимерные и неорганические пористые материалы, обладающие свойством селективной проницаемости к компонентам растворов Таким образом, мембранные методы, помимо очистки, позволяют одновременно осуществлять концентрирование и извлечение из сточных вод ценных растворенных веществ

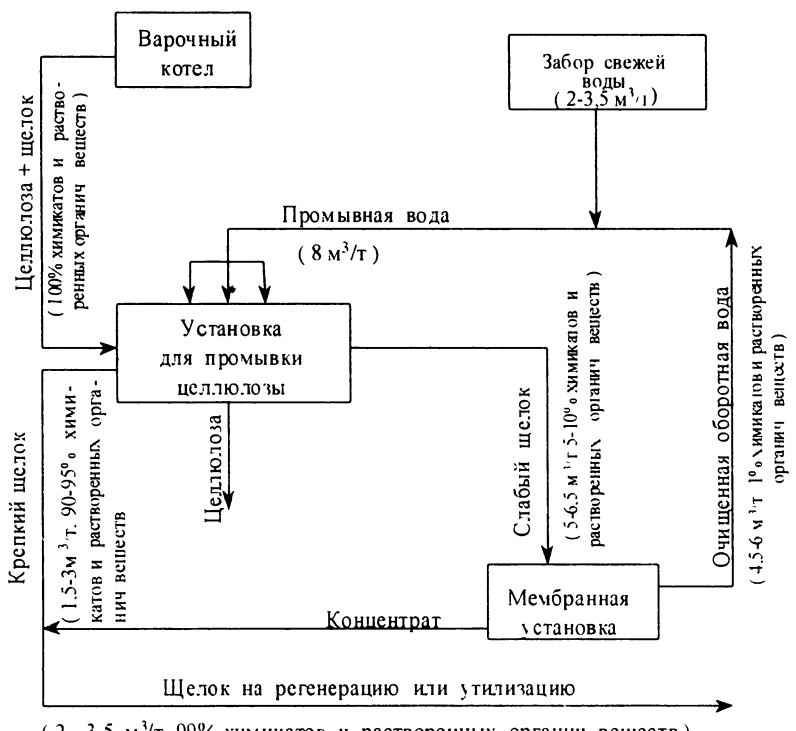


Рис 10 7 Технологическая схема очистки сточных вод с использованием мембранной установки со стадии промывки целлюлозы

Применительно к ЦБП принцип решения проблемы водопользования и очистки сточных вод заключается в максимальной обработке стоков непосредственно в производственных цехах предприятий, благодаря чему обеспечивается возможность повторного использования очищенной воды и регенерации ценных растворенных веществ При этом в каждом конкретном случае необходимо находить оптимальное сочетание традиционных и мембранных установок

На рис 10 7 приводится возможная схема очистки воды после стадии промывки, которая имеет место во всех технологических процессах производства целлюлозы. В предлагаемой схеме промывная вода разделяется

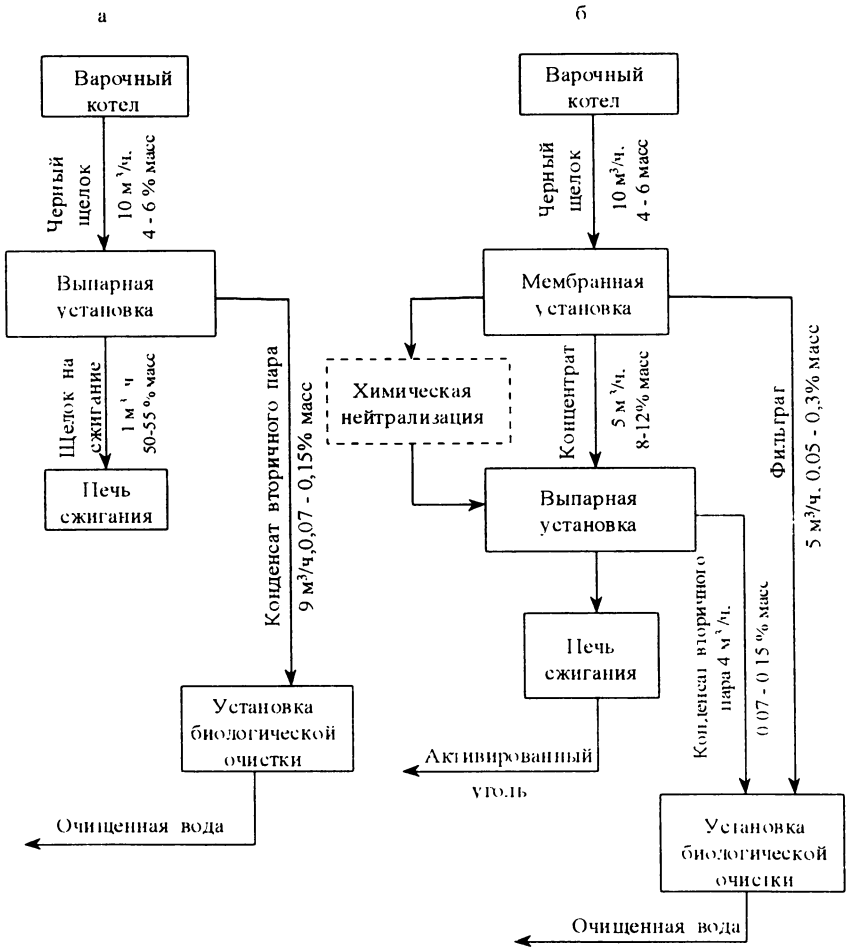


Рис 10 8 Действующая (а) и предлагаемая (б) технологические схемы обезвреживания черного щелока на кальциевом основании (Балахнинский ЦКК)

на два потока слабый щелок поступает на мембранный аппарат, далее по схеме концентрат объединяется с крепким щелоком для дальнейшей регенерации и утилизации, а очищенная вода возвращается в технологический процесс Из схемы видно, что использование обратного осмоса для очистки воды после стадии промывки целлюлозы позволит снизить расход свежей воды на 4,5-6 $м^3$ на тонну продукции Практически все растворенные химикаты и органические вещества направляются на регенерацию Снижается нагрузка на очистные сооружения, поскольку полностью исключается поступление слабого щелока в общий сток предприятия

Данная схема может быть применена на Байкальском целлюлозно-бумажном комбинате (ЦБК) и Селенгинском целлюлозно-картонном комбинате (ЦКК), что позволит обеспечить сохранение ресурсов о Байкал, создать замкнутую систему водопользования на предприятии и регенерировать Na_2SO_4 В настоящее время ведутся работы по реализации подобной схемы на Светлогорском ЦКК

Ниже будет показано (см разд 10 7), что при деминерализации 500 $м^3$/ч сточных вод Селенгинского ЦКК с помощью мембранной установки получается 446 $м^3$/ч воды, пригодной для повторного использования, и концентрированного раствора(54 $м^3$/ч), содержащего $X_{1ср}$ = 3170 мг Na^+/л, что в пересчете на Na_2SO_4 составляет

$$X_{1ср(Na_2SO_4)} = \frac{X_{1ср(Na+)} \cdot M_{(Na_2SO_4)}}{2 \cdot A_{(Na+)}} = \frac{3170 \cdot 142}{2 \cdot 23} = 9786 мг/л = 9{,}79 кг/м^3,$$

где $M_{(Na_2SO_4)}$ – молекулярная масса сульфата натрия, $A_{(Na+)}$ - атомная масса натрия

Следовательно, мембранная установка позволит регенерировать за год следующее количество сульфата натрия

$$Q_{(Na_2SO_4)} = X_{(Na_2SO_4)} \cdot L \cdot 24 \cdot n = 9{,}79 \cdot 54 \cdot 24 \cdot 306 = 3882 т,$$

где L - расход концентрированного раствора, ($м^3$/ч), n – число рабочих дней в году

Другая область практического применения мембранных установок – концентрирование загрязнений для более экономичного их уничтожения или утилизации На рис 10 8 представлены принципиальные технологические схемы уничтожения черного щелока на Балахнинском ЦКК Преимущества предлагаемой схемы *(б)* по сравнению с действующей *(а)* заключаются в следующем уменьшается количество и повышается концентрация черного щелока, поступающего на стадию выпаривания, что обеспечит значительное снижение общих затрат на его уничтожение Кроме того, предполагается, что применение мембран с невысокой селективностью позволит снизить концентрацию минеральных веществ в концентрированном черном щелоке, который из мембранного аппарата поступает на выпаривание, а затем на сжигание Это уменьшит отложение нерастворимого осадка в выпарных аппаратах и повысит их эффективность Одно-

временно снизится содержание минеральных веществ в продуктах сжигания, что даст возможность получать при сжигании черного щелока активированный уголь, который, как показали исследования ВНПО «Бумпром», может быть использован для очистки фенольных сточных вод

Возможно создание и более сложных схем для выделения, концентрирования и фракционирования лигносульфонатов с целью дальнейшей их переработки или утилизации. Такие схемы, включающие в себя узлы ультрафильтрационной и обратноосмотической обработки сточных вод, обеспечивают фракционирование лигносульфонатов по молекулярным массам и повышение концентрации высокомолекулярной фракции лигносульфонатов до 45%

Установлено, что при сульфитном производстве целлюлозы на магниевом основании концентрат после мембранной установки следует нейтрализовать, пропуская его через слой кускового брусита [минерал подкласса гидроксидов, $Mg(OH)_2$] Как видно из табл 10 7, при упаривании щелока, нейтрализованного до pH 6 – 7, в конденсат попадает на 87-96% меньше диоксида серы и летучих органических кислот Это снижает потери серы при утилизации щелока, уменьшает загрязнение конденсата выпарки и нагрузку на очистные сооружения предприятия, а следовательно, позволяет сделать производство более экологически чистым, дополнительно экономить воду, тепло и электроэнергию.

Таблица 10 7 Показатели конденсатов упаривания сульфитных щелоков целлюлозного производства на магниевом основании

Конденсат упаривания характеристики	Технологический процесс I		Технологический процесс II	
	без нейтрализации	с нейтрализацией	без нейтрализации	с нейтрализацией
SO_2 % (масс)	0,395	0,015	0,155	0,006
Летучие кислоты мг л	2760	360	1340	115
pH	1,60	2,95	1,50	3,20

В заключение следует отметить, что применение обратного осмоса и ультрафильтрации наиболее целесообразно при создании локальных установок обработки сточных вод Такой подход не ограничивает масштаб и области применения мембранных процессов, поскольку позволяет решить конечную задачу, а именно достигнуть наиболее высокой степени «замкнутости» систем водопользования на предприятиях ЦБП Наибольшая эффективность применения мембранных методов обеспечивается, как правило, при сочетании их с традиционными методами обработки сточных вод, что видно из рассмотренных технологических схем

10.6. Опытные установки для исследования мембран

Для экспериментов использовались лабораторные установки двух типов

В установке первого типа для создания рабочего давления использовалось давление сжатого газа, как правило азота В мембранной ячейке из стали Х18Н9Т в качестве полупроницаемых перегородок использовались различные пленочные полимерные мембраны Перемешивание жидкости в рабочей емкости установки осуществлялось лопастной мешалкой, приводимой во вращательное движение магнитами Мешалка была изготовлена из низкоуглеродистой стали и покрыта эпоксидной смолой или полиэтиленом для предотвращения коррозии Вращение магнитов осуществлялось с помощью электромотора со скоростью 10-250 оборотов в минуту Объем рабочей ячейки – 0,60 л

Установка второго типа включает в себя следующие основные элементы одну или несколько мембранных ячеек, насос-дозатор из нержавеющей стали и гидроаккумулятор для сглаживания пульсаций жидкости

Для исследования влияния гидродинамических режимов на характеристики процесса разделения, помимо перечисленных основных частей, установка была укомплектована теплообменниками, позволяющими поддерживать постоянную температуру исходного раствора, и ротаметром для определения расхода жидкости, проходящей через мембранную ячейку Количество фильтрата определяли с помощью мерных цилиндров, для регулирования рабочего давления использовали игольчатые вентили

Мембранная ячейка с магнитной мешалкой (рис 10 9) использовалась для определения рабочих характеристик и исследования процесса разделения с мембранами в виде пленок или пластин Ячейка состоит из двух фланцев *3*, изготовленных из стали Х18Н9Т Два отверстия верхнего фланца служат для входа разделяемого раствора в цилиндрическую камеру и выхода из нее Отверстия в центральной части нижнего фланца предназначаются для отвода фильтрата Полупроницаемая мембрана *4* устанавливается между двумя прокладками кольцеобразной *7* и круглой *5* формы Мембрана с прокладками помещается на микропористой подложке *6*, изготовленной на основе полимерных материалов (мипласт) или спрессованного металлического порошка Подложка воспринимает рабочее давление на мембрану, свободно пропуская фильтрат к центральному сливному отверстию Турбулизация жидкости в ячейке осуществляется при помощи магнитной мешалки *2* или за счет скорости протекания разделяемого раствора Диаметр рабочих частей мембраны составляет 30-100 мм, а высота камеры в разделительной ячейке, через которую протекает раствор, – 10-20 мм Диаметр мешалок на 10-20 мм меньше камеры разделительной ячейки.

Для проведения эксперимента при проточном движении разделяемого раствора относительно мембранной поверхности используется установка с лабораторным аппаратом типа «фильтр-пресс» Диаметр рабочей части мембран (и, одновременно, максимальный диаметр канала для прохода

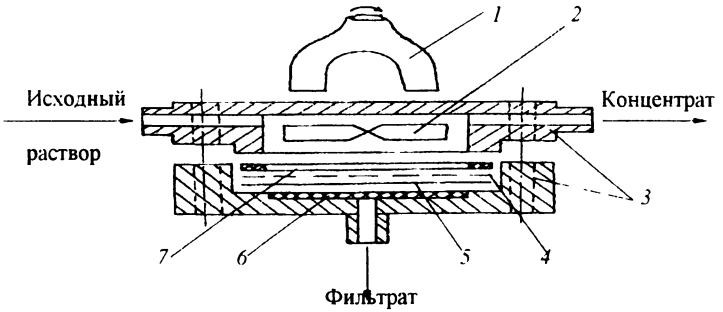


Рис 10 9 Схема ячейки для плоских мембран
1 магнит, *2* мешалка, *3* – корпус, *4* - мембрана, *5* подложка из ватмана, *6* - подложка из пористой металлокерамики, 7 прокладка

разделяемого раствора) равен 100 мм, высота канала (расстояние между мембранами двух секций) – 7 мм, диаметр переточных отверстий прижимного и опорного колец – 2,0 мм Материал ячейки – сталь Х18Н9Т Диапазон рабочих давлений P = (0-100)·10^5Па Количество циркулирующего раствора до 1600 л/ч обеспечивается интенсивным перемешиванием разделяемого раствора в межмембранном пространстве, что устраняет влияние концентрационной поляризации на характеристики процесса разделения

Исследование возможностей динамических мембран и их характеристики при очистке сточных вод ЦБП осуществлялось на экспериментальной *установке второго типа* с ячейкой, где в качестве пористой подложки использовались графитовые и керамические трубки Конструкция ячейки из нержавеющей стали позволяла использовать трубки с наружным диаметром 8-18 мм и длинной 110-400 мм, а также обеспечить возможность создания на них электрического поля

Аппарат, использовавшийся при исследованиях динамических мембран (рис 10 10), выполнен из нержавеющей стали в виде кожухотрубного теплообменника с крышками *1* и трубными решетками *2* В трубных решетках соосно с отверстиями *3* для подачи разделяемого раствора внутрь трубчатых элементов *5* сделаны углубления (гнезда) *4*, в которых с помощью склеивающего состава закреплены фильтрующие элементы Герметизация аппарата осуществляется с помощью уплотнений *8*, болтовых соединений (на рисунке не показаны) и шпилек *7*, которые одновременно обеспечивают фиксацию и центровку фильтрующих элементов (графитовые трубки диаметром 8 и 9 мм, толщиной 2 мм) Исходный раствор поступает в аппарат с торцевой части,а затем внутрь фильтрующих элементов При движении раствора по трубкам часть его проходит через стенки трубок и очищается от растворенных веществ, образуя фильтрат Другая часть разделяемого раствора выходит из аппарата в виде концентрата

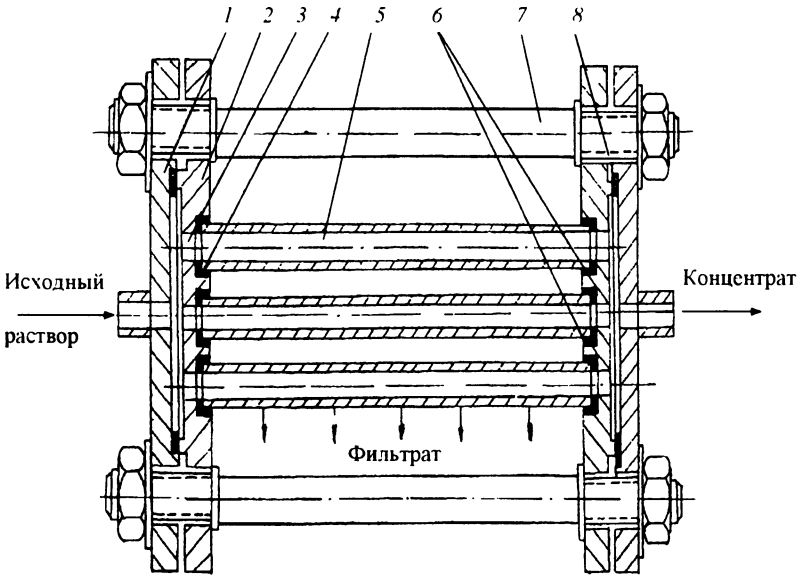


Рис 10 10 Бескорпусный трубчатый аппарат.
1 крышки, *2* – трубные решетки, *3* – отверстия для подачи и отвода раствора, *4* углубления, *5* трубчатые элементы, *6* – герметизирующий состав, *7* – шпильки, *8* – уплотнения

Бескорпусные трубчатые аппараты (смотри рис 10 10) поверхностью 0,0376 м^2 и 0,3 м^2 были испытаны при очистке сточных вод целлюлозно-бумажных заводов, авиационного топлива, других растворов и сточных вод Результаты показали их надежность и эффективность в работе, что позволило перейти к разработке промышленного аппарата с неорганическими мембранами (см разд 10 3 3)

Выбор методики проведения экспериментов осуществлялся с учетом литературных данных и результатов предварительных экспериментов

В случае применения *установки первого типа*, в которой для создания давления использовалось давление сжатого газа, исходный раствор заливался в рабочую емкость ячейки, а подключение к баллону со сжатым газом обеспечивало давление исходного раствора в необходимых пределах Давление поддерживали на заданном уровне с точностью $\pm 2{,}5 \cdot 10^5$Па Концентрация разделяемого раствора в данной ячейке непрерывно менялась в ходе проведения эксперимента, поэтому установку, в которой использовалось давление сжатого газа, применяли для испытания мембран и изучения процесса разделения разбавленных растворов и сточных вод невысокой концентрации, когда изменение последней практически не влия-

ло на характеристики процесса, а также для проведения предварительных экспериментов по концентрированию сточных вод

В опытах на *установке второго типа* с циркуляцией раствора исходный раствор также заливался в емкость, затем включался насос и регулировкой хода плунжера насоса устанавливался требуемый расход раствора Через 1-2,5 часа работы мембраны под рабочим давлением и в последующем через каждые 30-60 минут отбирались пробы фильтрата для анализа его состава Время отбора замерялось по секундомеру. Объем пробы составлял 5-500 мл в зависимости от производительности мембраны и требований методики анализа Одновременно контролировался расход циркулирующего раствора и отбирались пробы для анализа состава раствора, поступающего в мембранную ячейку (рис 10 9) и состава концентрата выходящего из нее Фильтрат, прошедший через мембрану в промежутке времени между отборами проб, вновь заливался в емкость для исходного раствора

Во всех случаях опыты велись до выхода на устойчивый режим работы, при достижении которого проницаемость (G) и селективность (φ) мембраны практически не изменялись со временем Проницаемость мембран G [л/(м^2 час)] рассчитывали по количеству прошедшего через мембрану фильтрата за единицу времени τ, отнесенного к рабочей площади мембраны $F_р$

$$G = V/(\tau \cdot F_р)$$

где V – объем фильтрата за время опыта, л, τ – время, ч , $F_р$ – поверхность мембраны, м^2

Селективность мембраны φ (%) находили из выражения

$$\varphi = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \cdot 100,$$

где X_1 – средняя концентрация растворенного вещества в разделяемом растворе, определяемая как среднее арифметическое значение концентраций в растворе, поступающем на мембрану и выходящем с нее, или как среднее арифметическое значение концентраций в растворе в начале и в конце опыта, X_2 – среднее арифметическое значение концентраций растворенного вещества в фильтрате

Поскольку разделительные характеристики полимерных мембран подвержены временно́му дрейфу, который вызывается уплотнением мембран под давлением, опыты по изучению влияния внешних факторов на процесс обратного осмоса обычно проводили при случайном задании значений переменных (давление температура, концентрация растворенных веществ и т д), что снижало погрешность, накладываемую дрейфом на характер получаемых зависимостей Кроме того, основные опыты по изучению зависимостей, характеризующих процесс разделения на полимерных мембранах, проводились не ранее чем через 10-20 часов работы новой

мембраны при максимальном рабочем давлении Благодаря этому исключался период, в котором свойства мембраны меняются особенно заметно

Перед каждым экспериментом определяли проницаемость мембраны по чистой воде при данном давлении, а через 2-3 опыта – селективность и проницаемость при разделении 0,15 – 2%-го стандартного раствора NaCl Постоянство этих величин свидетельствовало о неизменности структуры мембраны

Данные, полученные при температурах 20±3°С, включались в обработку характеристик разделения полимерных мембран Опыты по влиянию температуры на характеристики разделения динамических мембран проводили с использованием ультратермостата марки НБЕ, обеспечивающего точность поддержания температурного режима до 0,1 градуса Температуру в ячейке фиксировали с той же точностью с помощью лабораторного термометра, который был встроен на выходе из ячейки в линию, соединяющую ячейку с термостатом (емкостью исходного раствора)

10.7. Расчет технологических параметров мембранных установок очистки и концентрирования сточных вод

Технологический расчет мембранных установок для очистки и концентрирования сточных вод заключается в определении следующих параметров величины поверхности мембран (или числа аппаратов), расхода концентрированного раствора и фильтрата и их состава Известные методы расчета имеют ряд ограничений и применимы, в основном, для аппаратов типа фильтр-пресс с ацетатцеллюлозными мембранами Выражения для расчета поверхности мембран громоздки, и их решение вызывает определенные трудности Кроме того, для расчета необходимо экспериментальное определение основных характеристик процесса разделения, что затрудняет применение этих методов расчета для практических целей

Методика расчета, предложенная Г Терпуговым, основана на экспериментально полученных зависимостях селективности и проницаемости мембран от основных технологических параметров процесса и уравнениях материального баланса

$$L_0 = L + W, \quad L_0 \cdot X_{1H} = L \cdot X_{1K} + W X_{2cp},$$

где L_0 – количество исходного раствора, поступающего в мембранную установку на очистку или концентрирование, кг/ч, L – количество концентрированного раствора, выходящего из мембранной установки, кг/ч, W – количество очищенной воды (фильтрата) выходящей из мембранной установки, кг/ч, X_{1H}, X_{1K} – массовая доля или концентрация растворенных веществ в исходном растворе, в концентрированном растворе (кг/кг, г/л, мг/л), X_{2cp} – средняя массовая доля или концентрация растворенных веществ в очищенной воде (фильтрате) (кг/кг, г/л, мг/л)

В рассмотренных ниже расчетах предполагается, что процесс проводится при постоянных давлении и температуре, в установке практически исключается влияние концентрационной поляризации на селективность и проницаемость мембран Такие допущения представляются обоснованными по ряду причин Так, гидравлическое сопротивление мембранных аппаратов, используемых на практике, пренебрежимо мало по сравнению с рабочим давлением, которое составляет несколько десятков атмосфер Изменения температуры разделяемого раствора, которые могут иметь место при его концентрировании, обычно невысоки и не превышают нескольких градусов, в противном случае в установке предусматривается система охлаждения раствора Для устранения влияния концентрационной поляризации на характеристики процесса в мембранных установках обеспечивают интенсивную турбулизацию разделяемого раствора у поверхности мембраны Временной дрейф мембран (снижение проницаемости от срока работы) зависит от материала мембраны, ее структуры, типа и концентрации растворенных веществ, и его влияние специфично в каждом конкретном случае

В качестве иллюстрации предлагаемой методики рассмотрим расчет мембранных установок для двух случаев, которые при реализации обратного осмоса и ультрафильтрации в целлюлозно-бумажной промышленности найдут наиболее широкое применение 1) расчет мембранной установки для очистки сточных вод с целью повторного использования воды и 2) расчет мембранной установки для концентрирования ценных растворенных веществ с целью снижения затрат на их утилизацию и регенерацию

Например, *в первом случае* (см рис 10 7) требуется рассчитать рабочую поверхность мембранной установки (число мембранных аппаратов) для очистки сточных вод с целью повторного использования воды, производительность этой установки по очищенной воде и концентрированному раствору, а также концентрацию растворенных веществ в концентрированном растворе Предполагается использовать в установке аппараты с полыми волокнами и проводить процесс очистки сточных вод при рабочем давлении $P = 30 \cdot 10^5$ Па и температуре 35°С Производительность одного аппарата по воде при рабочем давлении и температуре 20°С составила $Q_0 = 0{,}7$ м^3/ч, а селективность при разделении стандартного раствора NaCl была равна $\varphi_{NaCl} = 92\%$ Количество и состав сточных вод, а также требования к очищенной воде по данным ВНПО «Бумпром» приводятся в табл 10 8

Таблица 10 8 Показатели сточных вод подаваемых на деминерализацию и после деминерализации (Селенгинский ЦКК)

Показатели качества воды	Сточные воды, подаваемые на деминерализацию*	Вода после деминерализации **
Минеральные, мг/л	3600	Не более 500
HCO_3^-	100	100
Cl^-	95 - 97	50
SO_4^{2-}	2000 - 2200	140
Ca^{2+}	95	95
Mg^{2+}	14,9	15
Na^+ и примеси K^+	1000 - 1080	80 – 100
Взвешенные, мг/л	15 - 45	15
Цветность, град ПКШ	120	Не более120
$БПК_5$, мг O_2/л	6 0	Не более 10
ХПК, мг O_2/л	300	Не более 300
pH	6,5	6,5 – 8,5

* Количество сточных вод, подаваемых на деминерализацию, – 500 м³/ч ** Вода после деминерализации может быть использована в варочном, промывочном и картонном цехах вместо свежей воды ПКШ – цветность по платино-кобальтовой шкале

Из анализа приведенных в таблице данных видно, что для создания замкнутой системы водопользования на Селенгинском ЦКК необходимо понизить в сточных водах концентрацию минеральных веществ, в основном требуется очистить воду от Na_2SO_4, так как многими учеными было установлено, что если в растворе присутствуют совместно одно- и двухвалентные ионы, то двухвалентные ионы обладают большей селективностью, чем одновалентные Поэтому расчет следует проводить по ионам Na^+,т е по сульфату натрия – основному минеральному компоненту сульфатных сточных вод (это видно из таблицы 10 8)

Согласно расчетам, применение мембранной установки обеспечит следующие показатели

Содержание ионов Na^+ в фильтрате, $X_{2ср}$	76 мг Na^+/л
Содержание ионов Na^+ в концентрате, $X_{1ср}$	9300 мг Na^+/л
Количество фильтрата, W	446 м³/ч
Количество концентрата, L	54 м³/ч
Число аппаратов, n	229 шт

Таким образом, применение мембранной технологии на стадии промывки целлюлозы позволит повторно направить в производство до 90% очищенной воды, в то время как по действующей технологии для этих целей используется свежая вода

На рис 10 11 приводится блок-схема алгоритма рассмотренного варианта расчета

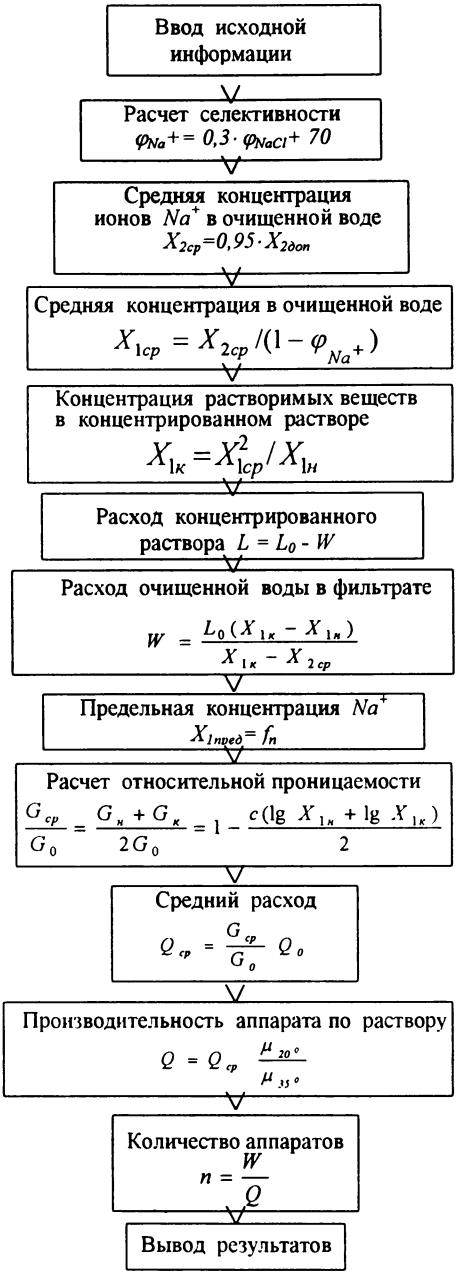


Рис 10 11 Алгоритм расчета мембранной установки по схеме, приведенной на рис 10 7 $f_{тт}$ – табличная величина

Для *второго варианта* (см рис 10 8 *б*) примем, что на мембранную установку непрерывного действия с рулонными (спиральными) фильтрующими элементами подается 10 $м^3$/ч черного щелока сульфатного производства целлюлозы, содержащего 4%(масс) растворенных веществ, из них 2% приходятся на минеральные компоненты (Na_2SO_4) и 2% – на лигнин и другие органические вещества Желательная конечная концентрация черного щелока – 8% Плотность черного щелока 1100 кг/$м^3$, предполагаемое рабочее давление $67 \cdot 10^5$ Па Из паспортных данных известно, что рулонный элемент с полиамидными мембранами имеет следующие технические характеристики

Производительность по воде	0,86 $м^3$/ч
Селективность по раствору NaCl	99 %
Максимальное рабочее давление	$70\ 10^5$ Па
Максимальная рабочая температура	45 С
Максимальные потери давления на один элемент	$0{,}69 \cdot 10^5$ Па

Необходимо определить количество рулонных элементов в установке

Расчет проводили по ионам Na^+ При использовании мембранной установки для предварительного концентрирования щелока были получены следующие результаты

Содержание ионов Na^+ в фильтрате, $X_{2ср}$	30,3 мг Na^+/л
Содержание ионов Na^+ в концентрате, $X_{1ср}$	14260 мг Na^+/л
Количество фильтрата, W	5,011 $м^3$/ч
Количество концентрата, L	4,989 $м^3$/ч
Число аппаратов, n	18 шт

Следовательно, мембранная установка на стадии предварительного концентрирования позволяет решить основную задачу – уменьшить нагрузку на выпарную установку и затраты на уничтожение щелока Кроме того, она позволяет направить очищенную воду в технологический процесс или, если селективность мембран недостаточна (менее 90 % по стандартному раствору NaCl) – на биологическую очистку, как это предусмотрено действующим технологическим процессом (см рис 10 8*а*) Блок-схема алгоритма решения данной схемы приведена на рис 10 12

Анализируя в целом рассмотренные примеры расчета мембранных установок, следует отметить, что предлагаемая методика применима для технологического расчета процесса разделения как сточных вод, так и бинарных растворов Для выполнения расчетов достаточно знать лишь проницаемость мембраного элемента и аппарата по воде и селективность при разделении стандартного раствора, которые обычно приводятся в технических (паспортных) данных, а также осмотическое давление раствора Полученные выражения для определения рабочей поверхности мембран и числа аппаратов в установке просты и удобны для вычислений Методика

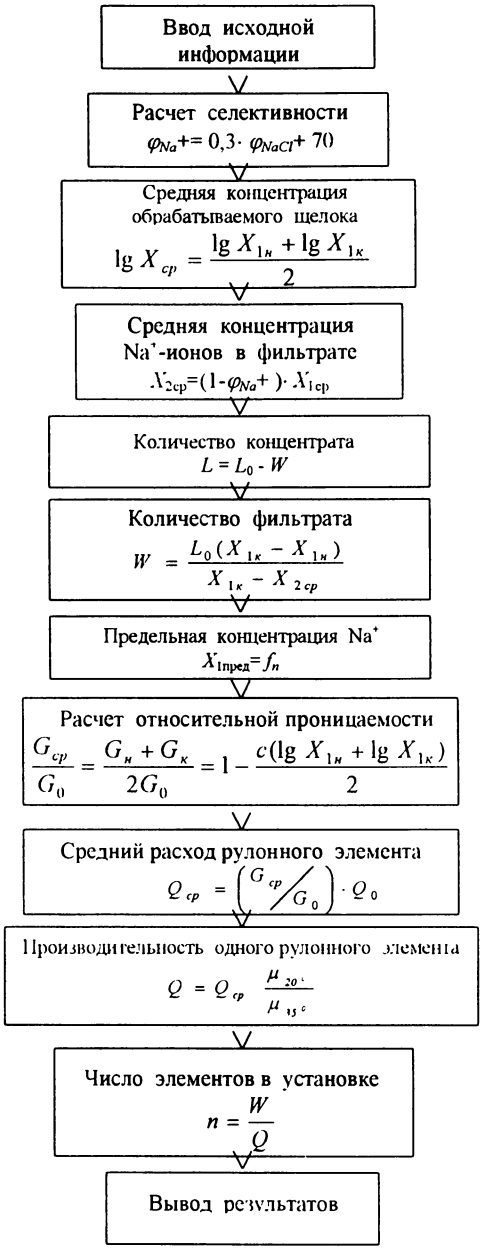


Рис 10 12 Алгоритм расчета мембранной установки по схеме, приведенной на рис 10 8б f_{11} табличная величина

позволяет рассчитывать четыре типа аппаратов с плоскими, трубчатыми и рулонными мембранными элементами и аппараты с мембранами в виде полых волокон

Необходимо отметить, что данная методика была успешно использована в Информационном Центре им М В Келдыша при проектировании мембранного узла опреснительной установки производительностью10 тысяч $м^3$/сут для ЮАР и при создании опытно-промышленной установки для очистки сточных вод АОО «Южно-Уральский криолитовый завод»

Глава 11

Замкнутые системы водного хозяйства

11.1. Замкнутая система водного хозяйства Первомайского промышленного узла

Неудовлетворительный водохозяйственный баланс в некоторых районах страны обусловливает необходимость оптимизации использования некоторых водных ресурсов Особого внимания заслуживают работы, связанные с созданием замкнутых систем водного хозяйства крупных промышленных узлов В современных условиях такие решения часто являются наиболее эффективными Полностью исключая сброс в водоемы хозяйственно-бытовых, промышленных и загрязненных ливневых вод, уменьшая расход свежей воды, эти системы позволяют обеспечить рациональное распределение водных ресурсов регионов с учетом интересов и возможностей всех предприятий и производств, значительно сократить затраты на их эксплуатацию, избежать дорогостоящих переброс речного стока из других бассейнов рек и т д

На рис 11 1 показана схема водного хозяйства промышленного узла с замкнутым циклом водообращения Примером практического создания такой системы водоснабжения является комплексная схема очистки и использования сточных вод и отходов производства, действующая на Первомайском промышленном узле (Украина, Харьковская область) Входящий в промышленный узел химический завод является крупным современным предприятием по мготоннажному производству хлора и каустической соды, пластических масс, химических средств защиты растений, синтетических моющих средств и ряда других продуктов Подобное производство требует значительных количеств технической воды и, как следствие, – большое количество сточных вод со сложным составом загрязнений

Первомайский промышленный узел расположен в густонаселенном аграрно-промышленном регионе Украины, в котором запасы пресной воды ограничены и практически отсутствует возможность сбрасывать сточные воды в поверхностные водоемы Это обстоятельство предопределило необходимость создания замкнутой системы водоснабжения, при которой все сточные воды после очистки возвращаются в производственный водооборот, свежая речная вода поступает на химический завод только для компенсации безвозвратных потерь, а сброс сточных вод отсутствует Из отходов извлекаемых при очистки сточных вод, изготавливают дефицитную товарную продукцию Цифры, приведенные в табл 11 1, дают общее

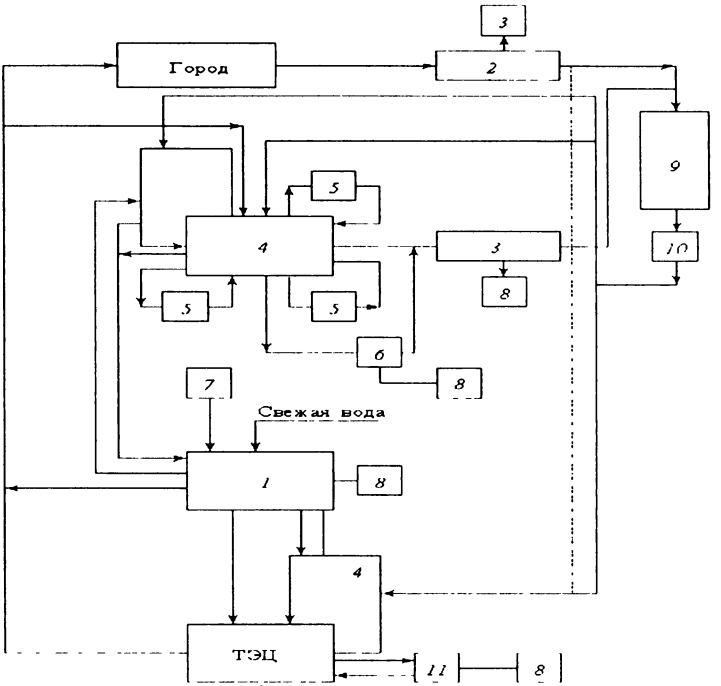


Рис 11 1 Схема водного хозяйства промышленного узла с замкнутым циклом водообращения

1 – станция водоподготовки и химической очистки, *2* – сооружения очистки городских стоков, *3* – сооружения очистки промышленных стоков, *4* – оборотная система охлаждающего водоснабжения, *5* – локальная замкнутая система технического водоснабжения, *6* – предварительная очистка локального потока сточных вод, *7* – накопитель ливневых вод с необвалованной территорией, *8* – сооружения по обработке осадков с получением товарного продукта и ли вторичного сырья, *9* – пруд, *10* – сооружения очистки воды, *11* – шламоотстойник

представление о сокращении потребления свежей речной воды и сброса сточных вод, и от использования очищенных сточных вод до и после внедрения замкнутой системы водоснабжения

Таблица 11 1 Водопотребление и использование сточных вод Первомайского промышленного узла до и после внедрения комплексной схемы очистки (в м^3 сут)

Параметры	До внедрения	После внедрения
Общее потребление свежей речной воды	175,6	29,4
в том числе химзаводом	150,7	4,5
Общий водооборот	688,4	688,4
Сброс сточных вод на биохимическую очистку	187,2	16 8
в том числе химзаводом	128,1	7 6
Сброс сточных вод в реку	139,3	-
Сброс сточных вод на захоронение	-	0 4
Возврат сточных вод в производство, %	20,5	96,7

В состав Первомайского промышленного узла, помимо Первомайского химзавода и города Первомайский, входят также теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), база стройиндустрии, заводы железобетонных конструкций, керамзитобетона, алюминиево-бронзовых сплавов, гидролизно – дрожжевой завод, хлебозавод, молокозавод, ремонтные базы сельхозтехники, нефте- и газоразведки, склады сельхозхимии и т п Сточные воды от всех перечисленных объектов поступают на очистные сооружения Первомайского промышленного узла, потребление свежей воды осуществляется от сетей химического завода (комплексная схема использования сточных вод Первомайского промышленного узла показана на рис 11 2) Одним из основных и наиболее сложных в инженерном плане узлов замкнутой малоотходной системы водоснабжения промузла является установка доочистки биохимически очищенных бытовых и промышленных стоков Место этой установки в замкнутой системе водоснабжения показано на рис 11 3

Для использования сточных вод для подпитки замкнутых систем оборотного водоснабжения требуется корректировка минерального состава воды, очищенной в адсорбционных аппаратах Цель корректировки - умягчение подпиточной воды, снижение ее общей минерализации до значений, позволяющих отказаться от стабилизационного сброса части оборотной воды для продувки водооборотных систем

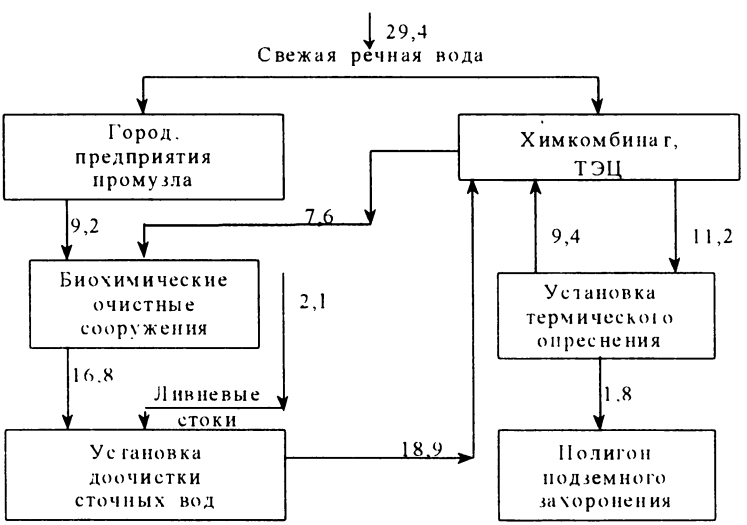
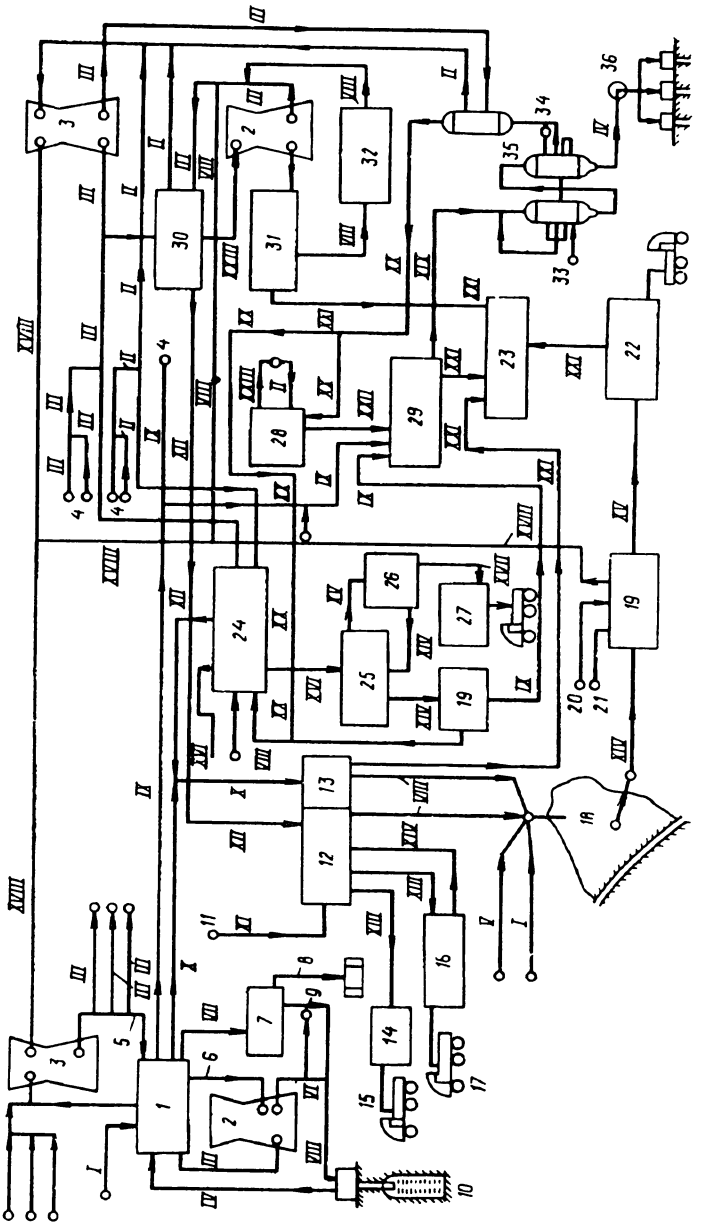


Рис 11 2 Принципиальная комплексная схема использования сточных вод Первомайского промышленного узла цифры – потоки в тыс м^3 сут



Институтом коллоидной химии и химии воды АН Украины разработана новая технология ионного обмена и регенерации ионообменных смол, используемых в установках доочистки сточных вод В отделении ионного обмена опытно-промышленной установки смонтировано четыре Н-катионитовых фильтра, а также шесть ОН-анионитовых фильтров Установка доочистки на Первомайском промышленном узле позволила полностью прекратить сброс в водоемы производственных сточных вод и сократить потребление свежей воды на 4 млн. $м^3$ в год Установка не только полностью окупилась, но и приносит доход за счет экономии свежей воды и получения товарной продукции

Экономический эффект от внедрения безотходной технологии глубокой очистки сточных вод на предприятиях химической промышленности может достигнуть сотен миллиардов рублей Технические показатели зарубежных комплексов по восстановлению качества воды с аналогичными показателями установки доочистки сточных вод Первомайского промышленного узла сопоставлены в табл 11 2 Создание подобной установки – первый пример реализации безотходного технологического процесса глубокой очистки сточных вод крупного промышленного предприятия с возвратом очищенных сточных вод в производство и получением из отходов товарной продукции. Выполненный комплекс работ является предпосылкой для эффективного и экономического решения важнейшей задачи – охраны водных источников от истощения и загрязнения

Рис 11 3. **Принципиальная схема очистки, использования и ликвидации сточных вод Первомайского химического комбината:**

I – речная вода, *II* – теплая вода, *III* – охлажденная вода, *IV* – рассол, *V* – ливневые стоки, *VI* – продувочная вода, *VII* – стоки от электролиза, *VIII* – очищенные стоки, *IX* – сильноминерализованные сточные воды *X* – слабоминерализованные сточные воды, *XI* – хозяйственно-бытовые сточные воды, *XII* – сточные воды загрязненные органическими соединениями, *XIII* – активный ил, *XIV* – осветленная вода, *XV* – осадок *XVI* – сточные воды, загрязненные суспензией ПВХ, *XVII* – обезвоженный осадок, *XVIII* – стоки после доочистки, *XIX* – подготовленные для опреснения стоки, *XX* – опресненные стоки, *XXI* – шлам, *XXII* – промывные воды от ионитовых фильтров, *XXIII* – горячая вода, *1* – производство каустической соды *2* – локальная система оборотного водоснабжения, *3* – кустовая система оборотного водоснабжения, *4* – подача воды от других производств, *5* – подача охлажденной воды для других производств, *6* – стоки от вымарки, *7* – локальная установка для очистки сточных вод, *8* – подача ртути на регенерацию, *9* – подача избытка продувочной воды на опреснение ртутьсодержащей воды, *10* – рассольные скважины, *11* – подача сточных вод из систем канализации города и промузла, *12* – сооружения для биохимической очистки сточных вод, *13* – сооружения для механической очистки сточных вод, *14* – иловые пруды и площадки, *15* – подача обезвоженного осадка для использования в качестве удобрения, *16* – установка для получения белково-витаминного препарата, *17* – транспортировка кормового концентрата, *18* – буферный пруд, *19* – установка для доочистки сточных вод, *20* – подача азотной кислоты *21* – подача аммиачной воды, *22* – установка для получения азотных удобрений, *23* – шламонакопитель *24* – производство суспензионного поливинилхлорида, *25* – сооружения для отстаивания и фильтрации сточных вод, *26* – установка для обезвоживания осадка, *27* – производство линолеума и плиток, *28* – химическая очистка воды, *29* – установка для очистки, умягчения и фильтрации сточных вод, *30* – производство ацетилена, *31* – установка для очистки продувочных вод, *32* – установка для озонирования стоков *33* – конденсат, *34* – опреснительная установка, *35* – пар, *36* – полигон для подземного захоронения рассолов

Таблица 11.2. Основные показатели эффективности работы установок глубокой очистки сточных вод

Показатели (в сопоставимых условиях)	Район местонахождения установок		
	оз. Тахо (США)	округ Оранж (США)	г. Первомайский (Украина)
Мощность по очищенной воде, $м^3$/сут	28 000	56 800	25 000
БПК, мг O_2/л	15 – 30	30 – 80	8 – 12
до очистки	1,0	2,0	1,0
после очистки			

11.2. Примеры схем использования воды в замкнутых системах

Разработку замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий можно осуществлять постадийно – с постепенным увеличением доли воды, используемой в обороте. Начальным этапом в создании таких систем должно быть определение научно обоснованных требований к качеству воды, используемой во всех технологических процессах и операциях. В большинстве случаев для выполнения технологических операций нет необходимости использовать питьевую воду. В то же время следует определить те показатели воды, которые оказывают решающее влияние на качество получаемого продукта, установить их допустимые пределы. Это позволяет создать рациональные системы оборотного использования воды. Для обеспечения санитарно-гигиенической и токсилогической безопасности при использовании очищенных промышленных и городских сточных вод в оборотных системах водоснабжения на действующих крупных предприятиях целесообразно проводить комплексные исследования для разработки оптимальной схемы очистки оборотных вод. Разработаны и проверены в промышленных масштабах различные методы опреснения сточных вод.

Ниже рассмотрены схемы замкнутых систем водообеспечения, которые можно использовать в химической и смежных с ней отраслях промышленности в качестве аналогов.

Николаевский межколхозный гидролизно-дрожжевый завод, построенный по проекту института «Южгипробиосинтез», не сбрасывает сточные воды в водоемы. Основную часть стоков гидролизно-дрожжевого цеха (так называемую последрожжевую бражку) направляют на очистку, проводимую в два этапа в биоокислителях различного типа, а также на цементный завод, где ею заменяют чистую речную воду для приготовления сырьевого шлама. Таким образом, хотя гидролизно-дрожжевый завод по-

прежнему забирает речную воду, в итоге она экономится, поскольку ее в еще бóльших количествах уже не забирает цементный завод

На рис 11 4 приведена схема водоснабжения, очистки и утилизации стоков Николаевского гидролизно-дрожжевого завода

В биоокислителях *14* обоих типов стоки очищаются при непрерывной воздушной продувке с использованием активного ила Он представляет собой хлопьеобразную массу, насыщенную микроорганизмами, способными «переваривать» органические отходы Образующийся избыток активного ила представляет собой товарную ценность После биоокислителей, а также после песколовки *10* ил отстаивается в отстойниках *11*, затем необходимую часть его возвращают в технологический цикл, а избыток отбирают и через насосно-воздуходувную станцию *13* подают в цех товарного ила Осветленную воду из отстойников направляют в биологические пруды *25*, из которых ее возвращают на градирню *3*, подают на полив или в смеси с отработанными стоками – на цементный завод

Описанная безотходная технологическая схема позволяет дополнительно вырабатывать более 300 т кормовых дрожжей ежегодно Цементный завод, используя стоки вместо речной воды, уменьшил влажность шлама на 2%, что позволило сократить годичный расход горючего газа, используемого для сушки, на 23 млн м^3

На основе опыта работы системы очистки и повторного использования сточных вод ЛенНИИгипрохим разработал принципиальную схему водоснабжения фосфорного производства для Шимкентского ПО «Фосфор» (Казахстан) без сброса сточных вод в водоемы (рис 11 5)

Схема включает в себя четыре локальные оборотные системы охлаждения аппаратов, технического водоснабжения, мокрых газопылеочистки и пылеуборки Свежая вода (*1*) используется только для подпитки оборотной системы охлаждения аппаратов, для снабжения котельных и лабораторий Продувочные воды охлаждающей оборотной системы и сточные воды лабораторий используются для восполнения потерь воды в системах технического водоснабжения, мокрых газопылеочистки (*5*) и пылеуборки (*8*)

Фосфорсодержащие сточные воды образуются при конденсации фосфора из печного газа промывке фосфора, хранении в отстойниках, когда вода непосредственно соприкасается с фосфорными шламами Основным процессом, определяющим загрязненность фосфорсодержащих сточных вод, является конденсация фосфора Значения pH сточных вод и содержание взвешенных веществ в них зависят от способа подготовки шихты

Оборотная вода для орошения печного газа используется после отделения фосфора в ваннах конденсаторов, в которых поддерживается постоянный уровень воды По мере накопления фосфора загрязненная вода вытесняется из ванн в бак сточных вод, а при перекачивании накопившегося фосфора в хранилище в ванны поступает подпиточная вода

Опыт эксплуатации такой замкнутой системы технического водоснабжения показал, что очистку фосфорсодержащих сточных вод с целью их повторного использования целесообразно ограничить удалением из них взвешенных веществ при условии стабильного поддержания нейтральной среды в системах конденсации фосфора Если фосфорсодержащие сточные воды имеют кислую реакцию, то осветленную воду нейтрализуют известковым молоком и вторично осветляют Было установлено, что при-

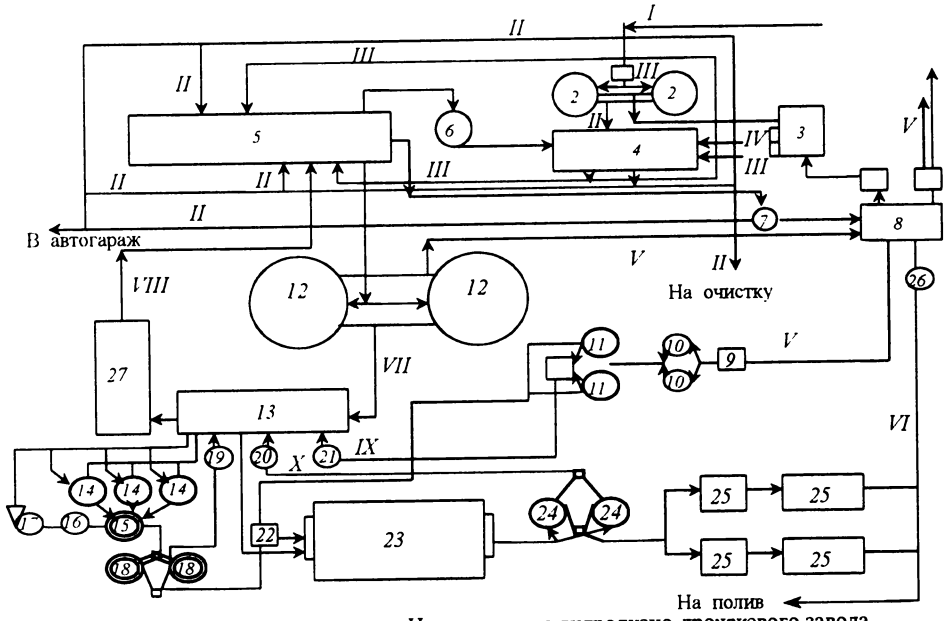


Рис 11 4 Схема водоснабжения, очистки и утилизации стоков Николаевского гидролизно-дрожжевого завода

I – речная вода, *II* – пожарная вода *III* – техническая вода, *IV* – нагретая вода, *V* – грязная вода, *VI* – очищенная вода, *VII* – бражка, *VIII* – ил на сушку, *IX* – первичный ил, *X* – активный ил, *1* – расходометр речной воды, *2* – резервуар-накопитель, *3* – градирня, *4* – насосная второго подъема, *5* – гидролизно-дрожжевой цех, *6* – резервуар нагретой воды, *7* – резервуар грязных стоков, *8* – насосная грязных стоков, *9* – приемная камера, *10* – песколовки, *11* – первичные отстойники, *12* – резервуары бражки, *13* – насосно-воздуходувная станция 14 – биоокислители *I* ступени *15* – флоратор, *16* – газоотделитель, *17* – насос, *18* – вторичные отстойники, *19* – сборник рециркуляционного или дрожжерастительных аппаратов, *20* – то же самое, аэротенков, *21* – сборник первичного ила узла механической очистки, *22* – камера смешения, *23* – аэротенк-смеситель, *24* – вторичные отстойники аэротенков, *25* – биологические пруды, *26* – сборник очищенных стоков, *27* – цех товарного активного ила

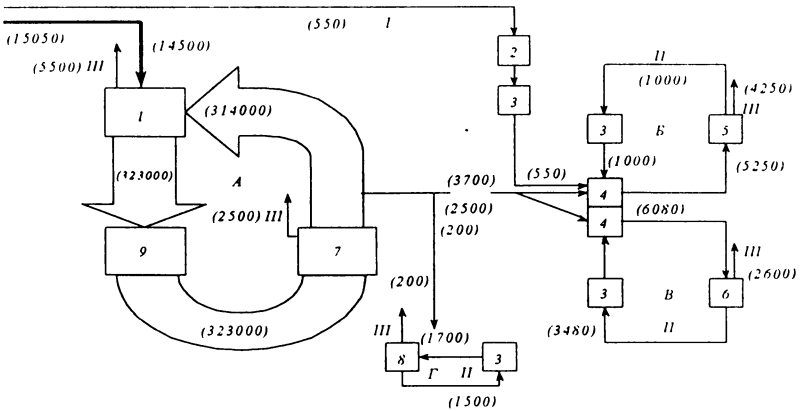


Рис 11 5 Принципиальная схема оборотной системы водоснабжения фосфорного производства, работающего без сброса сточных вод, (цифры в скобках – расход воды в $м^3/ч$)

1 – система охлаждающего водоснабжения, *Б* – система мокрой газопылеочистки, *В* – система технического водоснабжения, *Г* – система мокрой пылеуборки, *I* – свежая вода, *II* – оборотная вода *III* – потери воды, *1* – градирни, *2* – лаборатория, *3* – узел очистки сточных вод, *4* – секции накопителей сточных вод, *5* – узел мокрой газопылеочистки, *6* – узел технологических процессов производства фосфора, *7* – теплообменные аппараты *8* – узел мокрой пылеуборки, *9* – насосная станция

сутствующие в очищенных сточных водах примеси, специфические для данного производства, не оказывают отрицательного влияния на технологические процессы и качество продуктов производства Очистка локального потока сточных вод от аппаратов газопылеочистки сводится к выделению взвешенных веществ и регенерации абсорбционных растворов В отдельном цикле используется вода для мокрой пылеуборки Накопление растворимых примесей в замкнутом цикле исключается вследствие большого расхода воды на гранулирование шлака, где вода безвозвратно теряется, а примеси выводятся с отходами

В производстве термической фосфорной кислоты на привозном фосфоре замкнутая система водного хозяйства, разработанная ЛенНИИгипрохимом, функционирует на Крымском содовом заводе и в Славянском производственном отделении «Химпром» (Украина)

В производстве экстракционной фосфорной кислоты из флотационного концентрата фосфоритов Каратау и аммофоса замкнутая система водного хозяйства, разработанная НИИ удобрений и инсектофунгицидов совместно с Уралгипрохимом, внедрена на Алмалыкском химическом заводе (Казахстан)

Возможность работы по замкнутому циклу обеспечивается тем, что количество свежей воды, вводимой в процесс, равно количеству воды, выводимой с товарной продукцией (H_2SiF_6, фосфогипс, шлам от нейтрализации

сточных вод, целевые продукты – удобрения, фторсодержащие соли) и с отходящими газами

Кислые фторсодержащие сточные воды образуются в цехе экстракционной фосфорной кислоты при санитарной абсорбции фторсодержащих газов (скрубберная жидкость), после промывки полотен вакуум-фильтров и фосфогипса, в барометрических конденсаторах отделения фильтрования, а также после промывки оборудования и площадок Эти воды после барометрического конденсатора используются для промывки полотен фильтров, а затем фосфогипса, что позволяет уменьшить количество кислых вод, поступающих на нейтрализацию На станции нейтрализации кислые фторсодержащие сточные воды обезвреживаются известковым молоком, при этом соединения фтора и фосфора выделяются в виде малорастворимого осадка После отделения осадка в отстойниках осветленная вода охлаждается на градирнях и возвращается в производство

В производстве аммофоса во избежание образования кислых сточных вод, содержащих ионы аммония, в качестве поглотителя аммиака используют не воду, а фосфорную кислоту, которую возвращают в технологический процесс Кислые фторсодержащие сточные воды из санитарных скрубберов используют для увлажнения продукта в грануляторе и промывки газов, поступающих из сушильного барабана в скруббер-циклон Скрубберная жидкость непрерывно циркулирует в замкнутом цикле (скруббер-гранулятор) Таким образом, на заводе работают две оборотные системы 1) технического водоснабжения с повторным использованием кислых фторсодержащих сточных вод после их обезвреживания, осветления и охлаждения, 2) охлаждающего водоснабжения (рис 11 6) Потери воды в оборотной охлаждающей системе восполняются свежей водой, а в оборотной системе технического водоснабжения – продувочной водой оборотной охлаждающей системы

Принципиальная схема водопользования, исключающая сброс сточных вод в водные объекты, разработана ВНИИ синтетического волокна для завода по производству капроновых нитей и волокна Схема подготовки сточных вод для повторного использования включает совместную очистку производственных и бытовых сточных вод на внеплощадочных сооружениях и совместную очистку условно чистых и поверхностных вод флотацией (рис 11 7)

Оба потока сточных вод раздельно проходят открытые фильтры *11*, затем объединенным потоком – сооружения доочистки *17*, после чего охлаждаются и возвращаются в производство Для доочистки сточных вод предложено использовать процессы сорбции или озонирования Концентрированные сточные воды сжигаются совместно с обезвоженными осадками, образующимися при очистке всех потоков сточных вод, и с регенерационными растворами водоподготовки

Доочистка сточных вод сорбцией или озонированием запроектирована с учетом того, что сточные воды Черниговского ПО «Химволокно» (Укра-

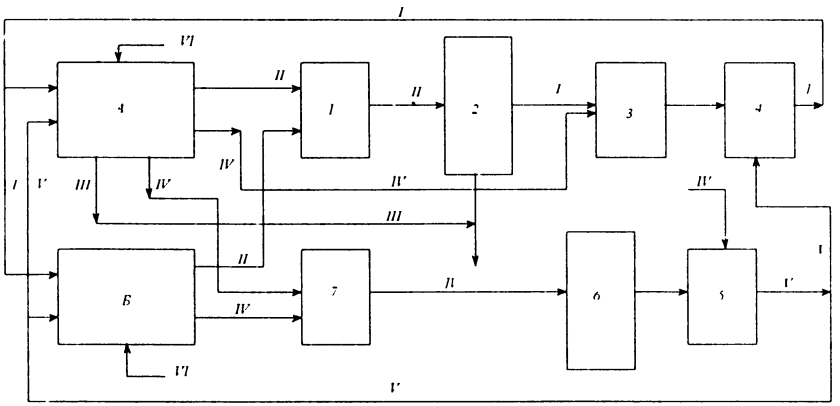


Рис 11 6 Схема использования воды в замкнутом цикле в производстве экстракционной фосфорной кислоты и аммофоса на Алмалыкском химическом заводе

А – цех экстракции фосфорной кислоты, *Б* – цех аммофоса, *I* – оборотная осветленная вода, *II* – кислые сточные воды, *III* – фосфогипс, *IV* – нагретая оборотная вода, *V* – оборотная охлажденная вода, *VI* – свежая вода, *1* – сборник кислых сточных вод, *2* – станция нейтрализации и осветления, *3* – градирня для осветленной воды *4* – сборник оборотной осветленной воды, *5* – сборник оборотной охлажденной воды, *6* – градирня для оборотной охлаждающей воды, *7* – сборник нагретой воды

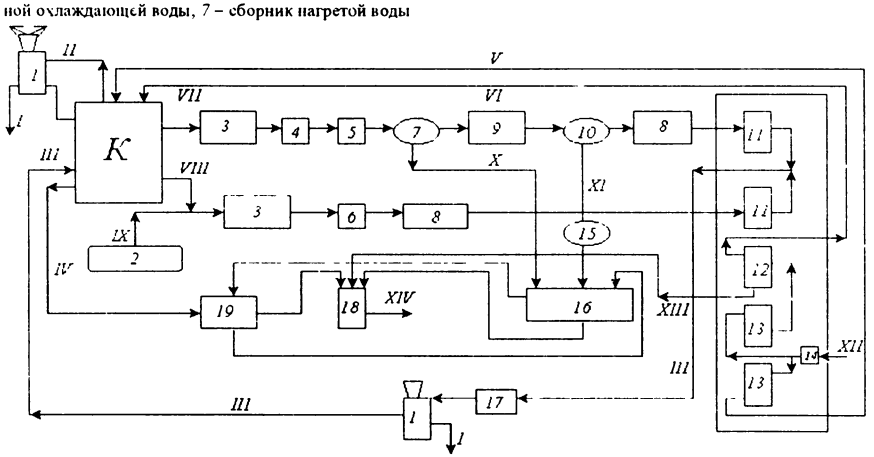


Рис 11 7 Принципиальная схема использования воды в производстве капроновых нитей и волокна (К)

I – продувочная вода, *II* – оборотная охлаждающая вода, *III* – смесь очищенных и доочищенных производственных бытовых, условно чистых и поверхностных сточных вод *IV* – концентрированные сточные воды, *V* – фильтрованная свежая вода, *VI* – обессоленная свежая вода, *VII* – смесь производственных и бытовых сточных вод *VIII* – условно чистые сточные воды, *IX* – поверхностные сточные воды, *X* – осадок первичных отстойников *XI* – избыточный активный ил *XII* – свежая вода из источников *XIII* – регенерационные растворы ионитных фильтров, *XIV* – зола, *1* – градирня, *2* – сборник поверхностных сточных вод, *3* – усреднители *4* – решетка *5* – песколовка, *6* – флотатор, *7* – первичный отстойник *8* – приемные емкости *9* – окситенк, *10* – вторичный отстойник, *11* – открытые фильтры, *12* – ионообменный фильтр, *13* – скорые напорные фильтры, *14* – микрофильтр, *15* – флотационный илоуплотнитель *16* – отделение обезвоживания, *17* – отделение доочистки сточных вод (адсорбер, озонатор и др), *18* – установка огневого обезвреживания, *19* – отстойник

ина) после биологической очистки имеют ХПК и $БПК_{полн}$, значительно превышающие величины, допустимые для воды, которая используется в качестве добавочной в оборотных охлаждающих системах Таким образом, в разработанной схеме рассматривается только очистка сточных вод на внеплощадочных очистных сооружениях.

Разработана комплексная схема очистки сточных вод, образующихся при производстве катионных красителей (рис 11 8)

Данная схема включает в себя стадии предварительное извлечение хлорида цинка из рассолов группы *I* и последующее использование этих рассолов в производстве. выделение солянокислого фенилгидразина и сульфата натрия из рассолов группы *II* и последующую совместную очистку рассолов групп *I* и *II* от органических соединений (для этого эти рассолы обрабатывают гипохлоридом натрия) При соблюдении оптимальных условий процесса хлорид цинка извлекается на 90-95%, фенилгидразин – на 90-92% а сульфат натрия – на 83-85%, остаточная ХПК рассола, возвращаемого в производство, не превышает 400 мг/л, содержание хлорида натрия составляет 8-10%

Разработанная и испытанная в промышленных условиях схема использования воды в производстве катионных красителей позволяет исключить сброс высокоминерализованных сточных вод в водоем и вернуть в производство 0,17 т хлорида цинка, 0,2 т фенилгидразина, 7,5 т сульфата натрия и 14 т хлорида натрия в сутки

В некоторых технологических процессах органического синтеза в качестве побочных продуктов образуются летучие органические соединения, которые удаляются из зоны реакции вместе с парами воды Обычно такие конденсаты отличаются высокой концентрацией органических соединений, сложностью химического состава и многокомпонентностью, поэтому переработка их в товарные продукты представляется нерациональной, их направляют на сжигание В таких случаях наиболее целесообразно подвергать образующиеся летучие органические соединения термокаталитическому окислению, в результате чего снижаются энергозатраты и получается чистая обессоленная вода, которую можно использовать для питания паровых котлов

Необходимость создания замкнутой системы водоснабжения на предприятиях калийной промышленности обусловлена, с одной стороны, дефицитом водных ресурсов, а с другой, большими затратами на очистку сточных вод Для получения 1 т калийных удобрений требуется 30 $м^3$ воды Обеспечение нормативного качества воды в приемнике сточных вод обусловливает необходимость деминерализации последних, что требует инвестиций в сооружение замкнутой системы, а также значительных эксплуатационных затрат

На предприятиях калийной промышленности с галургическим способом обогащения вода используется для охлаждения технологического и вспомогательного оборудования и перерабатываемого продукта, в технологическом процессе — на приготовление реагентов на нужды аспирации,

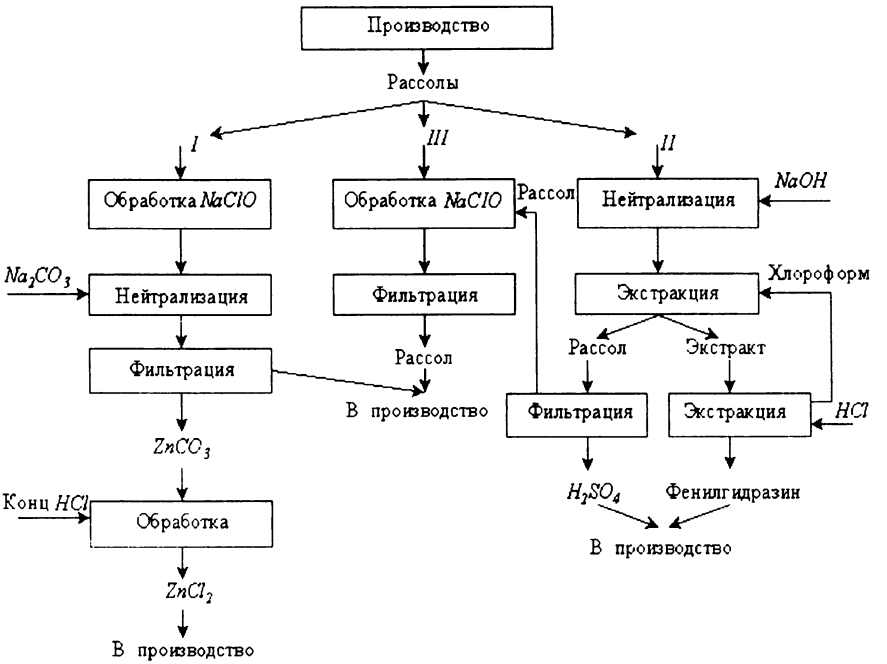


Рис 11 8 Принципиальная схема использования воды в замкнутом цикле в производстве катионных красителей (см пояснения в тексте)

промывку оборудования, на мытье полов и полив территорий промплощадок, а также на технологические нужды котельных и ТЭЦ рудников Как правило, для таких предприятий проектируют две оборотные системы охлаждающего водоснабжения, что обусловлено различием требований к качеству оборотной воды В частности, содержание солей в оборотной воде, используемой для охлаждения оборудования, должно быть не более 1 г/л, а в воде, используемой для охлаждения перерабатываемого продукта, – не более 15 г/л Это означает, что даже при последовательном использовании продувочной воды первой системы для подпитки второй системы образуются большие количества сточных вод, которые невозможно полностью израсходовать на технологические нужды Препятствием для сокращения количества продувочных вод за счет увеличения коэффициента концентрирования оборотной воды является необходимость проведения стабилизационной обработки воды

Разработаны методы и способы защиты оборудования и трубопроводов оборотных систем от коррозии, солеотложений и биообрастаний Эти меры позволят практически полностью исключить сброс продувочных вод в

водоем (последние можно использовать для технологических нужд), снизить удельное потребление свежей воды до 2-3 м^3 на 1 т 100%-го K_2O

Принципиальная схема водоснабжения и водоотведения предприятий и города приведена на рис 11.9 Для одного из производственных объединений, состоящего из трех рудоуправлений, замкнутая система позволяет сократить потребление технической воды на 12,2 млн м^3 за счет использования дождевых стоков (1,46 млн м^3/год) и городских сточных вод (10,74 млн м^3/год)

Имеется опыт создания замкнутых систем водного хозяйства промышленных районов с включением проточных водоемов аэробного типа, содержащих культуры высших водных растений Этот прием использован для очистки и доочистки слабозагрязненных сточных вод и поверхностного стока с территорий предприятий промышленного комплекса (г Волжский), в который входят предприятия органического синтеза, производства искусственного волокна, синтетического каучука, резинотехнических изделий, азотно-кислородное производство и ТЭЦ с общим количеством сточных вод в 100 тыс м^3 /сут Все сточные воды, образующиеся на промышленной и жилой территориях Волжского промышленного узла,несмотря на многочисленность и разнохарактерность предприятий, удалось сгруппировать в три больших потока.

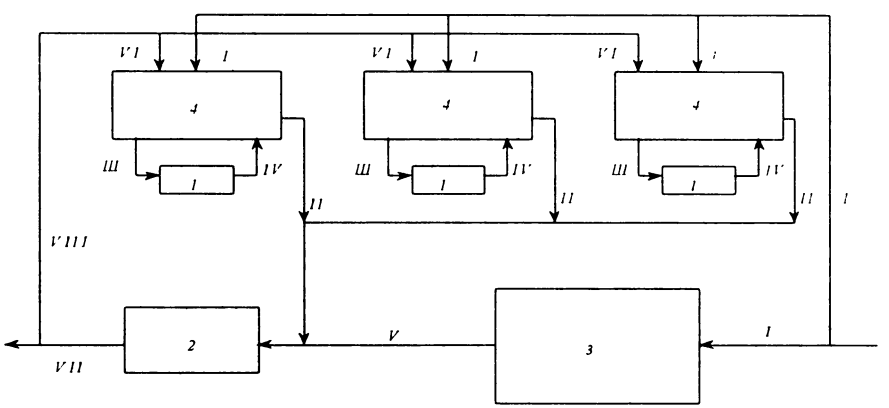


Рис 11 9 Принципиальная схема замкнутой системы водоснабжения предприятия калийной промышленности

I – хозяйственно-питьевой водопровод, *II* – хозяйственно-бытовая канализация, *III* – дождевая канализация *IV* – очищенный поверхностный слой, *V* – городская канализация, *VI* – очищенные сточные воды, поступающие на использование в систему промводоснабжения, *VII* – очищенные сточные воды, поступающие на земледельческие поля орошения, *VIII* – вода на повторное использование *1* – сооружения для аккумулирования и очистки поверхностного стока, *2* – городские очистные сооружения, *3* – город, *4* – рудоуправление

1) стоки от аппаратов водяного охлаждения, от охлаждения некоторых продуктов производства – в частности, резины и ее полуфабрикатов, а также ливневые стоки заводов,

2) хозяйственно-бытовые стоки заводов и города, а также стоки от небольших городских предприятий – хлебозавода, молокозавода, прачечных и др ,

3) химически загрязненные стоки заводов органического синтеза, синтетического каучука и др

Загрязнения, содержащиеся в *стоках первой группы,* представляют собой в основном механические примеси Их направляют через коллекторы в специальный открытый канал длиной 7,5 км, заросший водорослями В таких условиях происходит интенсивное биологическое окисление остаточных органических веществ, и вода здесь частично очищается в начале канала она еще подернута пленкой, а в конце его практически прозрачна По каналу вода поступает в пруд, где водная растительность развита еще сильнее Здесь вода пребывает 3-5 сут, и уже после этого (достаточно очищенную) ее возвращают в производство Чтобы восполнить потери на испарение (а они неизбежны в системах охлаждения), к ней добавляют, свежую волжскую воду

Стоки второй группы после полной биологической очистки направляют на земледельческие поля орошения

Наиболее трудную проблему представляют *стоки третьей группы.* Эти стоки разбавляют втрое обезвреженными хозяйственно-бытовыми стоками, подвергают тщательной биологической очистке и направляют в лиман, заросший тростником, расположенный примерно в 10 км от основных предприятий В лимане происходит их окончательная доочистка Аналогичная замкнутая система водного хозяйства северного промышленного района г Новочеркасска использована для доочистки промышленных и городских сточных вод

Представляет интерес проект замкнутой системы водоснабжения Тобольского нефтехимического комбината и промышленного узла, предусматривающий использование в этой системе смеси очищенных хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод (рис 11 10)

Внедрение замкнутой системы водного хозяйства первой очереди строительства Тобольского нефтехимического комплекса включает в себя газофракционную установку, три производства (дивинила из изобутана, изопрена из изопентана, изопрена из изобутилена и формальдегида), строительную базу, ТЭЦ и город Для создания такой системы требуется

– разработка и внедрение нового метода одностадийного дегидрирования бутана в производстве дивинила, что обеспечит уменьшение количества сточных вод более чем в 100 раз,

– применение аппаратов воздушного охлаждения, что позволит снизить расход воды примерно в 2 раза;

– организация локальных замкнутых систем технического водоснабжения с использованием для очистки методов отпарки, ректификации, нейтрализации, отстаивания,

– использование метода гидрокаталитического разложения для очистки сточных вод производства изопрена из изобутилена и формальдегида,

– комплексная схема очистки объединенного потока сточных вод производств дивинила и изопрена,

– беспродувочный режим работы оборотных охлаждающих систем

Производственные сточные воды последовательно проходят тонкослойные отстойники, окситенки, биосорберы, каркасно-засыпные фильтры, после чего смешиваются с очищенными городскими водами и объеди-

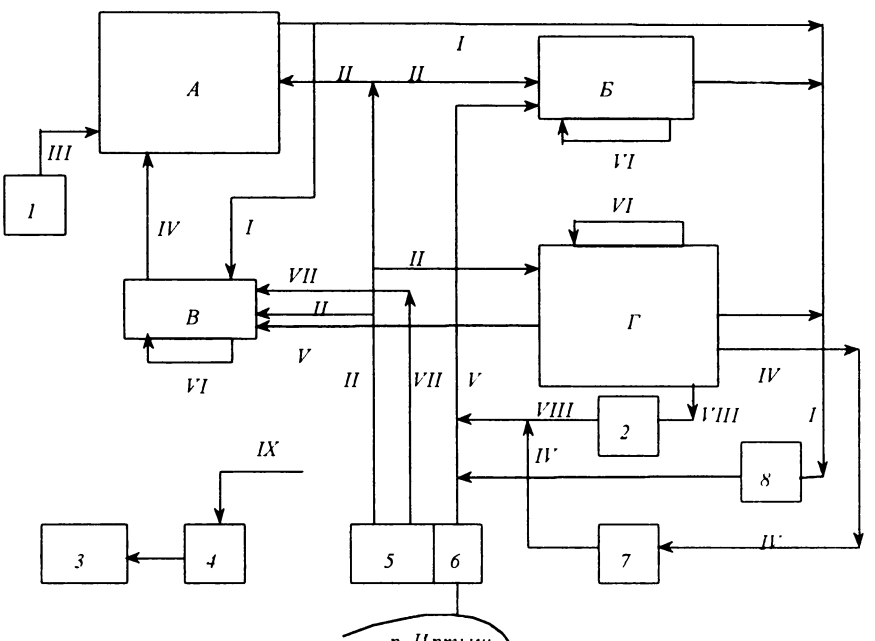


Рис 11 10 **Принципиальная схема замкнутой системы водообеспечения Тобольского промышленного узла**

А – Тобольск, *Б* – стройбаза, *В* – ТЭЦ, *Г* – нефтехимический комбинат; *I* – речная вода, *II* – хозяйственно-питьевая вода, *III* – подземная вода, *IV* – промывные воды *V* – осветленная вода, *VI* – оборотная вода *VII* – отфильтрованная вода, *VIII* – химически загрязненные сточные воды, *IX* – ливневые воды, *1* – подземные водозаборы, *2* – станция очистки химстоков, *3* – накопитель ливневых вод, *4* – узел очистки ливневых вод, *5* – станция фильтрации, *6* – станция осветления, *7* – узел очистки промывных вод, *8* – станция очистки хозяйственно-бытовых стоков

ненным потоком направляются в оборотную охлаждающую систему для восполнения потерь воды Городские сточные воды последовательно проходят тонкослойные отстойники, окситенки, каркасно-засыпные фильтры, контактный резервуар, где обрабатываются хлором, после чего смешиваются с очищенными производственными сточными водами При охлаждении воды на градирнях ее потери составляют на испарение – не более 1,8%, с капельным уносом – не более 0,15%, 5-8% оборотной воды подвергается очистке от взвешенных веществ в фильтрах типа ВСФ-2000

Возвращаемая в производство вода обеспечивает все технологические потребности нефтекомплекса Вода из Иртыша забирается практически только на хозяйственно-питьевые нужды и лишь изредка, в жаркие месяцы, подается в производство Замыкают безотходную технологическую схему водного хозяйства, спроектированную для Тобольского промузла, процессы обработки шламов, образующихся при очистке воды. Шламы от ливневых и промывочных вод промораживают с целью обезвоживания и уменьшения объема, после чего их используют для засыпки оврагов, планировки территории и т. п Шламы от бытовых и производственных сточных вод прогревают до 200°С и обезвоживают на ленточных фильтрах, после чего сжигают На случай аварийных ситуаций в схеме предусмотрены емкости для приема избыточных стоков и соответствующее резервное оборудование Внедрение описанной схемы позволило, помимо экологического эффекта, получить также значительный технико-экономический эффект

11.3. Автоматизированная система управления в промышленном водообеспечении

При разработке замкнутого цикла водообеспечения химических производств в обязательном порядке предусматривается автоматическое управление работой всех входящих в него сооружений При определении объема автоматизации сооружений учитываются их производительность, режим работы, требования к надежности, а также перспектива сокращения численности обслуживающего персонала, улучшение условий труда работающих, снижение потребления электроэнергии, расхода воды, реагентов и т д

Ниже приводятся общепринятые рекомендации для инженеров-проектировщиков автоматизированных систем управления промышленными замкнутыми схемами водообеспечения

Контролируемые параметры определяют, исходя из уровня автоматизации сооружений, условий их эксплуатации и требований к составу и свойствам воды

Система автоматизации сооружений включает в себя

автоматическое управление основными технологическими процессами в соответствии с заданным режимом или по заданной программе,

автоматический контроль практически всех параметров, характеризующих режим работы технологического оборудования и его состояние,

автоматическое регулирование параметров, определяющих технологический режим работы отдельных сооружений и их экономичность

Система автоматического управления предусматривает возможности местного управления отдельными устройствами или сооружениями Параметры для проектирования систем автоматизации любых типов и видов сооружений, которые могут являться составной частью замкнутых циклов водообеспечения, в настоящее время хорошо известны, равно как и технические пути их организации, контроля и регулирования Способ диспетчерского управления необходимыми параметрами выбирают, исходя из требований к эксплуатации автоматизированной системы управления, в том числе при включении ее в комплекс автоматизированной системы управления производством (АСУП) или автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) замкнутого цикла водообеспечения производства При этом, как правило, предусматривается также *телемеханизация* диспетчерского управления, объем которой в каждом конкретном случае устанавливают в зависимости от задач, поставленных перед диспетчерской службой, совместно с объемом автоматизации

Диспетчер должен иметь возможность принимать меры по локализации и устранению аварийных ситуаций, изменению и установлению режимов работы, оперативному включению и отключению отдельных агрегатов или сооружений, если эти операции невозможно или нецелесообразно выполнять средствами автоматики В особо ответственных случаях телеуправление можно применять в качестве средства, дублирующего устройства автоматики

Операции телеуправления на сооружениях, работающих без постоянного дежурного персонала, не должны сопровождаться дополнительными оперативными переключениями на управляемом объекте Принятый объем телесигнализации должен быть таким, чтобы диспетчер мог правильно оценить состояние и работу системы водоснабжения, он не должен содержать избыточной информации, которая не влияет на эту оценку В некоторых случаях объем сигнализации следует ограничить аварийными и предупредительными сигналами Телесигнализация должна подтверждать правильность выполнения диспетчером команд телеуправления

Объем телеизмерений обеспечивает диспетчера информацией о значениях основных технологических и электрических параметров, характеризующих работу системы водоснабжения в целом и отдельных ее сооруже-

ний и агрегатов При определении объема телеизмерений рассматривают возможность и целесообразность замены отдельных телеизмерений телесигнализацией предельных значений параметров и их отклонений Телеизмерение с целью сокращения числа каналов связи и приемных приборов осуществляют обычно по вызову или циклически

Параметры, измеряемые на телемеханизируемом пульте управления (ПУ), периодически регистрируют в устройствах обработки информации автоматическими регистрирующими устройствами Пульты управления систем водообеспечения следует размещать в соответствии с требованиями СНиП 2 04 02—84 «Водоснабжение Наружные сети и очистные сооружения»

В диспетчерской должны быть установлены диспетчерский пульт, диспетчерский щит, видеотерминальные устройства для отображения информации, печатающие устройства для регистрации параметров и событий управляемого процесса, телефонный коммутатор прямой диспетчерской связи и аппараты других видов связи На пультах управления располагают ключи и кнопки управления технологическими агрегатами, вызова телеизмерений, коммутации устройств телемеханики, а также приемные приборы контроля технологического процесса и контроля работы устройств телемеханики и линий (каналов) связи На диспетчерском щите находится мнемосхема со встроенной сигнализацией, отображающая технологическую схему системы водоснабжения

Видеотерминальные устройства (дисплеи) устанавливают на пульте управления в тех случаях, когда они входят в состав полукомплекта устройства телемеханики или когда имеется вычислительный центр с ЭВМ, комплектуемый видеотерминальными устройствами На дисплеи рекомендуется выводить алфавитно-цифровую информацию (значения технологических параметров, их отклонения, состояние оборудования) и графическую информацию в виде подробных фрагментов технологических схем с сигнализацией о состоянии элементов этих схем С клавиатуры дисплея на экран можно вызывать информацию, хранимую в памяти устройств телемеханики или ЭВМ

Мнемонические схемы диспетчерского щита могут быть мимическими (по схеме «темного щита») и световыми Мимические схемы имеют индивидуальное дублирование сигналов о несоответствии заданных параметров, при этом сигнал гаснет, а положение сигнализирующего объекта определяется положением ручки ключа дублирования, который встраивается в мнемосхему Мимические схемы применяют для отображения на щите или пульте диспетчера несложных и ненасыщенных технологических схем с редкими оперативными переключениями Для отображения информации на этих схемах в диспетчерской обычно достаточно установить щит или пульт Основным видом мнемосхемы является световая, которую

обычно выносят на щит, с общим дублированием Воспроизводство телеизмерений по вызову должно сопровождаться световыми сигналами, указывающими на мнемосхеме точку, в которой производится измерение

АСУТП представляет собой высший этап автоматизации работы замкнутых циклов водообеспечения химических предприятий или промышленных узлов и призваны обеспечить оптимальное ведение всех технологических процессов. Целью управления при этом является надежность водообеспечения предприятия с минимальными эксплуатационными затратами Переменная часть эксплуатационных затрат, зависящая от режима работы сооружений, включает расход электроэнергии на насосных станциях, утечки и нерациональные расходы воды, расход химических реагентов

Известно, что в промышленных водопроводах значительный перерасход электроэнергии (до 10-15%) обусловлен избыточными напорами воды, нерациональным распределением нагрузки между насосными станциями, а также работой насосных агрегатов при пониженных значениях КПД, на станциях очистки и кондиционирования отработанных вод возможен перерасход химических реагентов (на 20-30%) Поэтому при внедрении АСУТП, используя ЭВМ, телемеханическую и другую аппаратуру, осуществляют отбор информации о напорах в расчетных точках водопроводной сети и о параметрах работы насосных станций (расходе и напоре воды, расходе электроэнергии, значениях уровня воды в резервуарах), контроль за расходованием реагентов и работой очистных сооружений, анализ этой информации и расчет по определению оптимальных условий эксплуатации

АСУТП водоснабжения – это система, в которой человек (диспетчер), применяя различные технические средства, осуществляет управление процессом, используя рекомендации по оптимальному ведению технологического процесса водоподготовки и распределению воды, а ЭВМ производит первичную обработку информации, необходимые расчеты и выполняет роль «советчика» диспетчера или тренажера

Участие человека в управлении необходимо вследствие сложности замкнутых систем водоснабжения, а также наличия ряда неформализованных факторов, влияющих на принятие решений Включение человека в контур управления предполагает использование специальных технических средств отображения информации и ввода команд управления (мнемощитов, дисплеев, диспетчерских пультов и др)

Таким образом, АСУТП является информационно-советующей системой Однако в большинстве случаев технологическими процессами можно автоматически управлять и без участия человека (управление группой насосов, работающих на резервуар, артезианскими скважинами, дозированием химических реагентов, очистными сооружениями и др) В таких

случаях автоматическое управление осуществляется по определенной, заранее разработанной программе

Управление процессами подъема, очистки, подачи и распределения воды производится в условиях функционирования АСУТП по принципу «оптимизации прогноза». Это означает, что ЭВМ производит прогноз оптимального режима работы сооружений на предстоящий период (обычно на 24 ч), а затем оперативно контролирует напоры в сети, корректируя при необходимости расчетный режим Таким образом может осуществляться управление в нормальных условиях эксплуатации Однако на водопроводах нередки аварийные ситуации, связанные с разрывом труб или выходом из строя насосных агрегатов, необходимостью подачи повышенных количеств воды и т п В таких случаях диспетчер должен, используя ЭВМ, выбрать наиболее эффективный вариант действия по локализации аварий, т е определить, какие задвижки необходимо переключить и какие напоры должны развивать насосные станции в создавшихся условиях для обеспечения водой наибольшего числа потребителей

АСУТП включают в свой состав устройства локальной автоматики, системы централизованного сбора информации о технологических параметрах и состоянии оборудования, средства вычислительной техники и аппаратуру диспетчеризации Поэтому ее можно рассматривать как дальнейший этап развития автоматизации водообеспечения. Особенностью АСУТП, отличающей ее от системы диспетчерского управления, является использование вычислительной техники для расчетов оптимальных режимов работы водопроводных сооружений

При проектировании АСУТП водоснабжения разрабатывают организационную и функциональную структуру диспетчерского управления, т е состав автоматизируемых функций управления и алгоритмы решения задач, программное обеспечение, т е программы расчетов по решаемым задачам, техническое обеспечение, т е комплекс технических средств, необходимых для реализации функций управления Проект должен включать также расчет экономической эффективности В этих условиях требуется перестройка организационной структуры диспетчерского управления с учетом технологической взаимосвязи объектов водоснабжения, их территориального размещения, технических возможностей современных систем сбора и передачи информации Диспетчерская служба, обеспечивающая функционирование системы управления, как правило, должна быть одноступенчатой, двух- и трехступенчатая организационная структура оперативного управления не допускается

Перечислим основные функции АСУТП замкнутых систем водообеспечения промышленных предприятий.

– централизованный контроль состояния технологических объектов управления,

– оперативный учет,
– расчет технико-экономических показателей,
– диагностика технологических процессов;
– прогнозирование технологических процессов,
– определение рационального режима технологических процессов

Разработаны алгоритмы и программы решения задач выбора оптимального режима эксплуатации замкнутых циклов водообеспечения, а также ее прогнозирования Эффективность системы управления во многом зависит от рационального выбора комплекса технических средств, позволяющего своевременно получать и обрабатывать информацию и обеспечивать выполнение задач технологического управления Выбор технических средств должен производиться с учетом их совместимости, модульности, надежности, максимальной эффективности и системного подхода

Решение задач систем управления технологическим процессом характеризуется интеграцией управления технологическим оборудованием и оперативно-производственного управления в единую систему, если между ними имеется тесное логическое и информационное взаимодействие В соответствии с этим выбор технических средств определяется функциональной структурой системы управления, организационной и информационной структурами управления, устанавливающими содержание и последовательность этапов обработки информации в системе

Технические средства при этом должны выполнять следующие функции связь с объектом, сбор, передача, накопление и хранение информации; связь с оператором и отображение информации, обработка информации в соответствии с принятыми алгоритмами Основные виды аппаратуры датчики, исполнительные механизмы, аппаратура регулирования, средства связи и аппаратура телемеханики, персональный компьютер, диспетчерское оборудование

Для получения первичной информации и технологических параметров процесса обработки, подачи и распределения воды служат датчики расходомеры, манометры, уровнемеры, измерители и сигнализаторы динамического уровня воды в скважинах, измерители тока или потребляемой электроэнергии, качественных параметров воды и др К числу исполнительных механизмов относятся станции автоматического управления насосными агрегатами, электроприводы задвижек и поворотных затворов, механизмы управления электрооборудованием насосных станций, дозаторы химических реагентов и т д

Для обработки поступающей информации и расчета оптимальных режимов работы замкнутых систем водного хозяйства рекомендуется использовать мини- и микро-ЭВМ и построенные на их базе управляющие вычислительные комплексы

11.4. Модели систем водообеспечения промышленных предприятий

Анализ опыта проектирования и эксплуатации замкнутых систем водного хозяйства показывает, что такие системы экономически целесообразно предусматривать при проектировании новых и реконструкции действующих предприятий

В связи с большим числом технических решений замкнутых систем водообеспечения возникает необходимость их классификации по степени сложности По предложению Л Алферовой и А Нечаева их можно разделить на пять групп

– системы, требующие разработки и внедрения новых технологических процессов и оборудования,

– системы, основанные на совершенствовании существующей технологии и оборудования,

– системы, для осуществления которых необходимо внести некоторые изменения в технологический процесс (например, при обогащении руд),

– системы, для которых требуется разработка и внедрение методов очистки локальных потоков сточных вод, обеспечивающих работу внутритехнологического оборотного водоснабжения и утилизацию извлеченных продуктов,

– системы, требующие осуществления мероприятий по использованию известных приемов и методов централизованной очистки сточных вод, а также кондиционирования воды оборотного водоснабжения

Наибольшие трудности вызывает реконструкция водного хозяйства действующих предприятий При этом решающее значение имеют местные (специфические) факторы ограниченность свободной производственной площади, трудности прокладки дополнительных сетей внутри цехов и по территории предприятия, необходимость разумно использовать уже существующие и действующие установки и сооружения, сложившаяся технология производства и многое другое В таких случаях возможно много вариантов технических решений

Для выбора оптимальных параметров развития систем водного хозяйства предприятий необходимо знать, как зависят их внутрипроизводственные затраты от объема потребления внешних ресурсов С этой целью разрабатывают модель развития водного хозяйства предприятия, включающую анализ и технико-экономический расчет различных вариантов, обеспечивающих потребности производства в воде при фиксированных значениях объемов использования внешних ресурсов и соответствующих им внутрипроизводственных затратах

В предлагаемой модели водное хозяйство предприятия рассматривается

в различных вариантах – от прямоточной до замкнутой системы при фиксированном объеме производства Расчет по предложенной модели может быть скорректирован в соответствии с научно обоснованными нормами водопотребления

Для разработки модели водного хозяйства предприятия необходима исходная информация о назначении воды в промышленном производстве, условиях ее использования и требованиях к количеству и качеству воды В краткой характеристике предприятия указывают его местоположение, отраслевую принадлежность, основные виды выпускаемой продукции, основные производственные мощности предприятия, площадь промышленной территории, источники водоснабжения По данным паспортов технологического оборудования цехов определяют, для каких технологических нужд необходима вода, каковы ее категория и расход, режим водопотребления и водоотведения, расходы производственных сточных вод и концентрация загрязнений в них, безвозвратные потери в производстве, а также расход и качество дождевых вод и свежей воды Исходные данные либо устанавливаются предприятием, для которого разрабатываются варианты водного хозяйства, либо берутся на аналогичных предприятиях отрасли Общий расход технологической воды предприятия в целом определяется суммированием технологических расходов воды различных категорий по всем водопотребителям

Для сопоставления схем первоначально группируют водопотребителей по однородным требованиям к качеству потребляемой воды и составу образующихся сточных вод В зависимости от вида обработки (или типа использования) сточных вод все локальные системы предприятия принято разделять на шесть условных зон. I – зона чистого оборотного цикла, II – зона механической очистки, III – зона физико-химической очистки, IV – зона биологической очистки,V – зона доочистки (механической), VI – зона доочистки (деминерализация, обработка осадка) Для каждой группы водопотребителей рассматривают несколько вариантов локальных схем водопользования – от простейших до сложных Усложнение схем идет по пути углубления степени очистки сточных вод и роста доли водооборота, что приводит к уменьшению доли свежей воды и сброса загрязнений Рассматриваемые схемы образуют в пределах каждой группы потребителей варианты развития локальной схемы водопользования, по которой заполняются специальные таблицы (по типу табл 11 3)

Для каждой категории сточных вод выбирают методы очистки, хорошо зарекомендовавшие себя с технической и экономической стороны Согласно выбранным методам и с учетом отраслевых рекомендаций формируют схемы водоподготовки с целью частичного или полного возврата сточных вод в производство (после реализации всех зон очистки)

Таблица 11.3. Схема водного хозяйства предприятия

Зона	Тип стока	S_0, тыс руб/год	Вода (C_1)			Взвесь (C_2)		Хром (C_3)		Нефтепродукты(C_4)		Фенол (C_5)		БПК (C_6)		S_0 тыс руб/год	Потери
			$\Delta\bar{X}_1$	X_1	G_1	$\Delta\bar{X}_2$	G_2	$\Delta\bar{X}_3$	G_3	$\Delta\bar{X}_4$	G_4	$\Delta\bar{X}_5$	G_5	$\Delta\bar{X}_6$	G_6		
I	1 Чистый оборотный цикл	7,08	460,05	0	464 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	4,65
	2 Грязный оборотный цикл	0	0	726,90	726,90	0	21,70	0	0	0	0	0	0	0	0	-	2,20
	3 Хромсодержащий цикл	0	0	0,58	0,58	0	0	0,019	0	0	0	0	0	0	0	-	0,04
	4 Сток загрязненный органическими веществами	0	0	165,02	165,02	0	1,43	0	0	0	0,06	0	0,008	0	11 37	-	-
	5 Сток с высокой концентрацией органических в-в	0	0	4,86	4,86	0	4,44	0	0	0	0	0	0,36	0	113 49	7,08	0,32
II	2 Сток загрязненный взвесью	909,15	716,11	0	726,9	28,99	21,70	0	0	0	0	0	0	0	0	14,16	10,79
III	3 Хромсодержащий цикл	47,60	0	0,58	0 58	0	0	0,019	0,019	0	0	0	0	0	0	923,31	0,32
IV	4 Сток загрязненный органическими веществами	46 > 72	153.18	0	165,02	1,42	1 43	0	0	0,02	0,06	0 003	0,008	10,87	11,57	970,91	12,42
V	5 Сток с высокой концентрацией органических в-в	498	0	4,86	4 86	4,44	4 44	0	0	0	0	0 36	0 36	113,49	113,49	1454,6	4,70

Примечание. $C_1 = 0$, $C_2 = 0.02$, $C_4 = 0$, $C_4 = 0.0003$ $C_5 = 0,000001$, $C_6 = 0.003$, $G_{теол} = 1357.2$, $G_{сток} = 1346.4$ Потери при прямотоке 1.39 м³/ч, существующие капитальные затраты 7.08 тыс руб/год

На рассматриваемом предприятии выделены пять видов сточных вод три чистых оборотных цикла, которые в таблице могут быть выписаны отдельно или в виде строки, сточные воды, содержащие взвешенные вещества, содержащие хром, органические соединения, высокие концентрации органических соединений Для зоны I (см табл 11 3) рабочей является первая строка, которая показывает количество условно чистых вод, возвращаемых в оборот, ΣG_I – технологический объем воды, необходимый для производства при прямоточной системе; X_I – объем сбрасываемой воды после использования в локальной схеме, $\Delta\overline{X_1}$ – максимальное сокращение потребления свежей воды в j-й схеме Далее в таблицу заносят рассчитываемые величины максимальных масс i-го загрязнения, удаляемого на очистных сооружениях Уравнение материального баланса имеет вид

$$\Delta\overline{X}_i^j = C_i X_1^j + G_i^j - X_i^j,$$

где C_i – концентрация i-го загрязнения в свежей воде, X^j_1 – объем потребления свежей воды j-й группой водопотребителей, G^j_i – масса веществ, вносимых в воду в процессе производства j-й группой водопотребителей, X^j_i – масса сброса i-го загрязнения от j-й группы водопотребителей

В зоне I удаления загрязнений не происходит, поэтому $\Delta\overline{X_i^j} = 0$. В зону II включены стоки, проходящие механическую очистку В случае идентичности составов они могут быть записаны одной строкой Остальные типы стоков (3, 4, 5) для простоты в таблицу не вписаны При заполнении следующих зон необходимо учесть возможность двух вариантов 1) сток после очистки возвращается в оборот; 2) качество стока после очистки недостаточно для повторного использования на данном предприятии Во втором случае $\Delta\overline{X_i^j} = 0$, и стоки из данной зоны переходят в следующую, где степень очистки повышается. Число стоков в зоне в этом случае не уменьшается.

Данные, приведенные в табл 11 3, являются исходной информацией для получения функции затрат по зонам в зависимости от объемов использования внешних ресурсов $S^{\text{з}}_0 = f(X_j)$. Величина S^I_0 для первой зоны складывается из затрат на сети и насосные станции при прямоточной системе водоснабжения Для последующей зоны S^{II}_0 складывается из S^I_0 предыдущей зоны и затрат S_I на сооружения оборотного цикла либо на системы очистки данной зоны. Суммарные приведенные затраты на содержание бессточной системы предприятия складываются из затрат на организацию отдельных зон. Разработанная авторами программа позволяет получить для каждой зоны уравнение вида

$$S^j_0 = A + BX_1 + CX_2 + \quad + DX_m,$$

где A, B, C – коэффициенты полинома, X_1, X_2, , X_m – расходы внешних ресурсов предприятия, m – число видов загрязнений.

График, показанный на рис 11 11, иллюстрирует этапы развития водного хозяйства рассматриваемого предприятия, характеризуемые сокращением водоотведения при увеличении объемов оборотных систем, что обусловлено углублением степени очистки стоков Существующие объемы потребления свежей воды и инвестиции в водное хозяйство определяют положение точки A, характеризующей состояние водного хозяйства Использование предложенной методики позволяет оценить эффективность введения схем очистки и водооборота на отдельных предприятиях и обосновать распределение инвестиций в развитие водного хозяйства

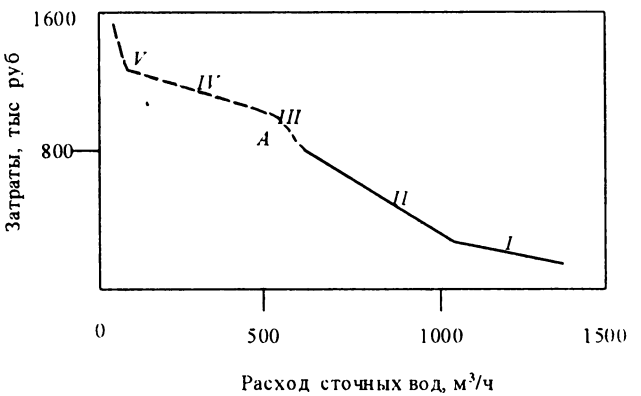


Рис 11.11 График затрат при различной степени очистки стоков.
I - V – этапы создания замкнутых систем водного хозяйства (штриховой линией показан резерв сокращения водоотведения)

11.5. Разработка замкнутой системы водообеспечения Калушского промышленного узла (Украина)

Рассмотрим пример научно-технической разработки замкнутой системы водообеспечения для Калушского промышленного узла В состав системы входят химические, химико-металлургические, горнодобывающие, энергетические и другие предприятия На территории промышленного узла расположен населенный пункт Химические предприятия в основном крупнотоннажные производства, перерабатывающие хлор Они потребляют значительное количество речной и артезианской воды

Загрязнения сточных вод промышленного узла имеют сложный состав Каждый вид сточных вод (хозяйственно-бытовые, минерализованные, загрязненные органическими соединениями, ливневые и гипохлоритные) отводится по индивидуальной канализации Принципиальная схема водопотребления и водоотведения со сбросом сточных вод в р Днестр показана на рис 11 12 Расход производственной воды равен 59,9 тыс $м^3$/сут Источником производственного водоснабжения (максимальная водоотдача 95,0 тыс $м^3$/сут) является Рожнятковское водохранилище (р Чечва) Переброска части стока рек Ломницы и Дубы позволяет увеличить отдачу водохранилища до 173,0 тыс $м^3$/сут В Днестр сбрасывается 53,4 тыс $м^3$/сут сточных вод (с учетом дренажных вод Домбровского карьера) Со стоками в реку за сутки поступает более 300 т солей Потребность промышленного узла в производственной воде в будущем составит 180,0 тыс $м^3$/сут, т е превысит возможный водозабор из Чечвы, количество отводимых сточных вод должно возрасти до 66000 $м^3$/сут, общее содержание солей может достигнуть 350 т/сут

Сброс стоков промышленного узла с соблюдением ПДК вредных веществ возможно только при условии значительного разбавления их речной водой Поэтому потребуется строительство нового водохранилища для обеспечения дополнительной подачи воды 600тыс $м^3$/сут Санитарная характеристика вод Днестра приведена в табл 11 4

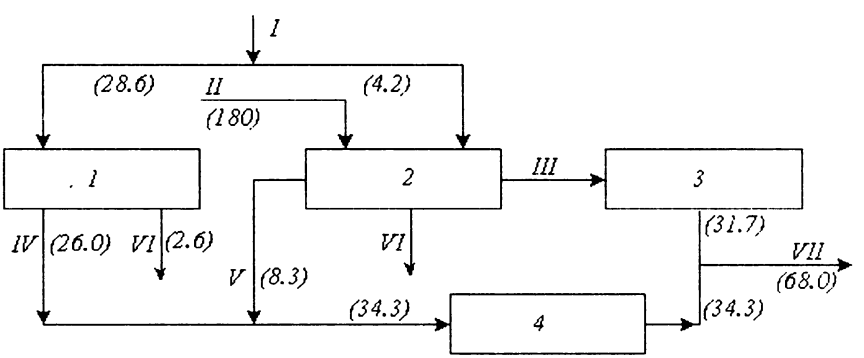


Рис 11 12 Действующая схема водообеспечения Калушского промышленного узла (цифры в скобках – потоки в тыс.$м^3$/сут)

I – питьевая вода, *II* –речная вода *III* – минерализованные стоки *IV* – хозяйственно-бытовые стоки *V* – хозяйственно-бытовые стоки и стоки, содержащие органические вещества, *VI* – потери, *VII* – сброс в водоем *1* – г Калуш и предприятия, *2* – химический завод, калийное, магниевое и горнорудное производства химической фабрики, районная ГЭЦ, *3* – установка физико-химической очистки сточных вод, *4* – установка биохимической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод и сточных вод загрязненных органическими веществами

Таблица 11.4 Санитарная характеристика вод Днестра

Показатели воды	Существующие	Допустимые
$БПК_5$, мг O_2/л	0,5 – 10,7	5,25
O_2, мг/л	8,3 – 14,0	5,79
Взвешенные вещества, мг/л	12 – 23	20
Общее солесодержание, мг/л	395 – 871	742
в том числе		
хлориды, мг/л	243	285
сульфаты, мг/л	235	37,8
соли аммония, мг/л	1,54	1,13
pH	7,5 – 8,3	5,0

Нецелесообразность строительства нового водохранилища и возможность увеличения сброса солей в открытые водоемы явились причиной разработки комплексной схемы, предусматривающей замкнутую систему водоснабжения, которая позволит.

– обеспечить потребность промышленного узла в производственной воде без увеличения мощностей водоподающих и водоочистных сооружений и емкости водохранилища,

– значительно сократить, а затем полностью ликвидировать сброс сточных вод в Днестр,

– утилизировать солевые сбросы с целью получения минеральных удобрений и сырья для производства хлора и каустической соды,

– использовать органические осадки сточных вод для получения удобрений и кормового концентрата

В процессе проработки комплексной схемы было рассмотрено несколько вариантов.

Вариант I. Минерализованные сточные воды после физико-химической очистки, хозяйственно-бытовые стоки после биологической очистки и дренажные воды Домбровского карьера сбрасываются (при соблюдении ПДК) в Днестр.

Для осуществления этого варианта потребуется строительство нового водохранилища и расширение водоподающих сооружений для покрытия нужд промышленного узла в производственной воде и воде, необходимой для разбавления стоков перед сбросом их в водоем, а также расширение водоотводящих и очистных сооружений Этот вариант рассмотрен для оценки экономической эффективности принятого варианта комплексной схемы очистки и использования сточных вод

Вариант II. Часть минерализованных стоков (12 тыс. $м^3$/сут) направляется на установку опреснения (дистиллят возвращается в систему произ-

водственного водоснабжения, а рассолы отводятся на полигон подземного захоронения) Остальные стоки сбрасываются в Днестр В перспективе потребуется увеличить объем водохранилища для обеспечения водопотребления

Вариант III. Минерализованные стоки (за исключением 12 тыс $м^3$/сут, отводимых на опреснение) подаются на ионообменную установку, совместно с хозяйственно-бытовыми и загрязненными органическими соединениями стоками, прошедшими биологическую и адсорбционную очистку В результате общее солесодержание в такой очищенной воде снижается до 1 г/л и ее направляют в систему производственного водоснабжения

Регенерированные растворы с ионообменной установки поступают на утилизацию (производство гранулированных минеральных удобрений) Сырой осадок, образующийся на сооружениях биологической очистки, обезвреживается на радиационной установке, обезвоживается и в дальнейшем используется как органическое удобрение Из избыточного активного ила готовят кормовой концентрат

Варианты IV и IVa аналогичны варианту III, но производительность установки опреснения увеличивается вдвое При этом производительность ионообменной установки уменьшается

Вариант V. На полигон подземного захоронения направляются только сточные воды Домбровского карьера с содержанием солей 168 т/сут Остальные стоки (хозяйственно-бытовые и загрязненные органическими соединениями, прошедшие биологическую очистку, минерализованные – нейтрализацию) направляются на адсорбционную и ионообменную установки для доочистки

При выборе оптимального варианта комплексной схемы очистки и использования сточных вод основное внимание было уделено техническим решениям, позволяющим сократить объем сточных вод и загрязнений, поступающих в поверхностные водоемы, за счет применения прогрессивных методов очистки и повторного использования сточных вод в системе производственного водоснабжения предприятия При этом соответственно снижается и потребление свежей воды Основные технические показатели рассмотренных вариантов схемы водопотребления и водоотведения приведены в табл 11 5

На основе анализа приведенных вариантов и сравнениях технико-экономических показателей был рекомендован к разработке скорректированный по производительности отдельных очистных установок вариант IVa (рис 11 13), который включает в себя следующие основные производственные процессы

1) самостоятельные водооборотные циклы в каждом производстве с устройством необходимых локальных очистных установок и последующим использованием очищенных стоков в производстве,

Таблица 11.5. Технические характеристики различных вариантов (I–V) обеспечения водой Калушского промышленного узла

Сооружения и установки	Производительность, тыс м^3 / сут					
	I	II	III	IV	IVa	V
Водохранилище и расширение водоподающих и водоотводящих сооружений	500	250	-	-	-	-
Установка опреснения минераллизованных стоков	-	12	12	29	24	-
Установка адсорбционной доочистки	-	-	34	34	34	34
Установка ионообменной доочистки	-	-	54	20	10	62
Установка упарки сточных вод Домбровского карьера	-	-	-	-	1	-
Полигон подземного захоронения концентрированных рассолов*	-	0,6	0,6	1,5	1,2	1,0

* В вариантах II—IVa объем закачки определяется производительностью опреснительной установки, в варианте V — количеством дренажных вод Домбровского карьера

2) опреснение минерализованных сточных вод, прошедших предварительную нейтрализацию, механическую очистку и фильтрацию с солесодержанием 5 – 8 г/л. Принят дистилляционный метод опреснения в деся-

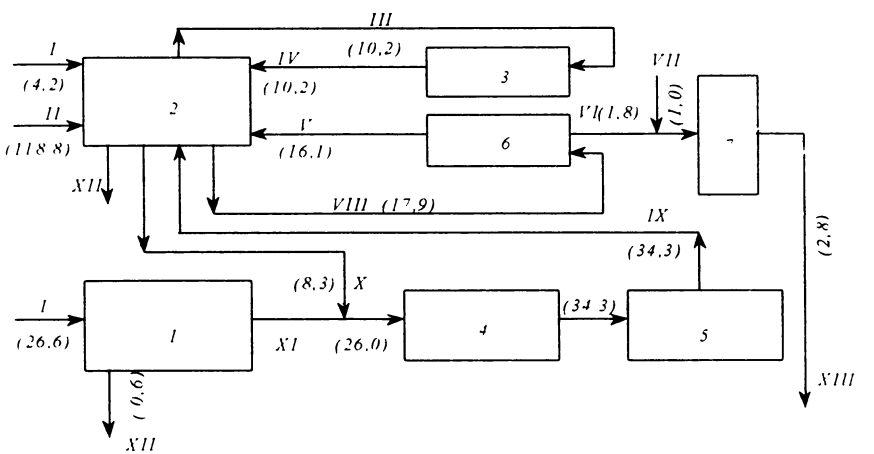


Рис 11.13. Предлагаемая схема замкнутой системы водообеспечения Калушского промышленного узла (цифры в скобках – потоки в тыс м^3/сут)

I – питьевая вода, *II* –речная вода, *III* – слабоминерализованные стоки, *IV* – умягченная вода *V* – обессоленная вода, *VI* – рассол, *VII* – стоки Домбровского карьера, *VIII* – сильноминерализованные стоки, *IX* – доочищенные стоки, *X* – хозяйственно-бытовые стоки и стоки, содержащие органические вещества *XI* – хозяйственно-бытовые стоки, *XII* – потери, *XIII* – на захоронение, *1* – г Калуш и предприятия, *2* – химический завод, калийное магниевое и горнорудное производства химической фабрики, районная ТЭЦ, *3* – установка ионообменной очистки сточных вод, *4* – установка биохимической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод и сточных вод загрязненных органическими веществами, *5* – установка адсорбционной доочистки *6* – установка термического опреснения *7* – поглощающие скважины

тикорпусной выпарной установке Дистиллят после опреснения направляется на действующие сооружения химической очистки воды для доочистки, а затем в качестве питательной воды – на ТЭЦ Концентрированный рассол с содержанием солей 280-300 г/л поступает на полигон подземного захоронения (временно) В последующем рассол будет использоваться в качестве сырья для производства хлора и каустической соды,

3) корректировка солевого состава продувочных вод оборотных циклов магниевого производства и калийных удобрений. Принят метод ионного обмена, позволяющий снизить общее солесодержание в обрабатываемой воде с 2,5 до 0,9 г/л Очистка ведется по непрерывной схеме на Н-катионитовых и ОН-анионитовых фильтрах Очищенная вода направляется в систему производственного водоснабжения Регенерация ионообменных смол периодическая Регенерационные растворы ионообменной установки сбрасываются в канализацию минерализованных сточных вод и далее направляются на установку термического опреснения, а после замены реагентов — на установку получения минеральных удобрений Это позволит резко уменьшить расход реагентов, а также получить концентрированные растворы нитратов и солей аммония, из которых в сушилках-грануляторах можно будет получать смеси гранулированных азотных удобрений,

4) адсорбционная доочистка хозяйственно-бытовых сточных вод предприятий г Калуша, прошедших биологическую очистку, и сточных вод, загрязненных органическими веществами Для доочистки применяется метод непрерывной адсорбции в кипящем слое с противоточной подачей адсорбента, что особенно важно при большом расходе сточных вод В качестве сорбента используют микропористый уголь По своим свойствам (прочности, насыпной массе, смачиваемости, объему адсорбционно-активных пор, адсорбционной емкости и т д) микропористый уголь превосходит другие промышленные угли как отечественных, так и зарубежных марок Доочищенные воды направляются в систему производственного водоснабжения,

5) получение кормового концентрата из избыточного активного ила сооружений биологической очистки Кормовой концентрат предназначен в качестве добавок в корм скоту Метод его получения в основном сводится к частичному обезвоживанию и сгущению суспензии активного ила и его сушке на сушилке-грануляторе с кипящим слоем,

6) получение органических удобрений из сырого осадка первичных отстойников сооружений биологической очистки Для обеззараживания суспензии сырого осадка используется ускоритель электронов, а для обезвоживания сырого осадка – фильтр-прессы, затем осадок сушится в сушилке-грануляторе с псевдоожиженным слоем;

7) переброска сильноминерализованных дренажных вод Домбровского карьера в хвостохранилище, а затем на полигон подземного захоронения. В дальнейшем предусматривается транспортировка этих рассолов на химические фабрики для получения калийных удобрений.

Предлагаемая схема очистки сточных вод Калушского промышленного узла имеет следующие преимущества по сравнению с действующей схемой водопотребления и водоотведения.

– не требуется увеличения забора свежей воды и не нужны дополнительные дорогостоящие водохранилища,

– практически исключается опасность загрязнения поверхностных водоемов сточными водами;

– уменьшается стоимость строительства очистных сооружений;

– удлиняется межремонтный период работы теплообменной аппаратуры и улучшаются условия ее эксплуатации, что обусловлено отсутствием солей в дочищенной сточной воде;

– из сточных вод при очистке можно извлекать полезные вещества и перерабатывать их в товарную продукцию

11.6. Эколого-экономическая эффективность водопользования

Опыт развитых стран, как и наш собственный показывает, что исключительно важное значение в природоохранной деятельности имеет не только общий объем финансирования, но и вся система экономического стимулирования плата за ресурсы (в том числе за сброс сточных вод в природные водоемы), налоговые льготы, субсидии, займы, а также налоги, пошлины, штрафы и т.д Налоги, штрафы и сборы являются эффективным средством стимулирования разработки и применения экологически более совершенных технологий в том случае, если они имеют достаточно высокие размеры

Штрафы должны отчетливо ощущаться предприятиями, при этом штраф оплачивается предприятием из его прибыли и не включается в стоимость изделий. Штрафы должны устанавливаться на длительный период, носить четкий и ясный характер, а схема определения штрафных санкций должна быть тщательно продумана Эти поступления в бюджет должны расходоваться исключительно на природоохранные цели

Штрафные платежи являются весьма эффективным стимулом к применению малоотходных и безотходных технологий, если существуют экологически обоснованные альтернативные технологии Кроме того, предприятия вынуждены сообщать широкой общественности (в частности населению, проживающему в непосредственной близости от предприятия) об

элементах экологического риска и возможном загрязнении окружающей среды, связанных с деятельностью этого предприятия

За рубежом приоритет по инвестициям отдается тем фирмам, которые осуществляют сбор и переработку отходов (бумаги, металлов, стекла, пластика и т д), а также некоторым крупным предприятиям, существенно влияющим на состояние окружающей среды При оценке роли субсидий была выявлена четкая грань между помощью по оплате исследований и разработок, а также капиталовложений в оборудование по борьбе с загрязнениями Более предпочтительной оказалась финансовая поддержка программ исследований, а не субсидирование капиталовложений в оборудование Особенно эффективно финансирование долгосрочных, координируемых на международном уровне программ по разработке превентивных технологий (т е. технологий, предупреждающих экологические загрязнения) В нашей стране предприятия должны быть поставлены в такие условия, в которых уже находятся фирмы большинства развитых стран, когда более выгодно внедрять малоотходные и безотходные процессы, чем платить штрафы

Идея эта, как видно, не нова, но пока плохо реализуется в России по ряду причин, одной из которых (но достаточно важной) является отсутствие жесткого природоохранного законодательства и надежных методик по оценке ущерба, наносимого окружающей среде различными выбросами промышленных и сельскохозяйственных предприятий, в том числе и в водный бассейн Однако необходимо подчеркнуть, что в настоящее время, к великому сожалению, не используются вовсе или используются очень плохо существующие методические руководства Все они имеют те или иные недостатки и, безусловно, нуждаются в совершенствовании И тем не менее их игнорирование наносит окружающей среде и рациональному природопользованию страны гораздо больший урон, чем те ошибки, которые могут возникнуть при оценке эколого-экономической эффективности по этим методикам

11.6.1 Экономический ущерб от загрязнения водных ресурсов

Известно, что загрязнения, поступающие в водоемы, изменяют физико-химические, биологические и санитарно-гигиенические характеристики водной среды, что отрицательно сказывается на качестве водных ресурсов и эффективности работы водопотребителей и водопользователей Последним приходится прибегать к дополнительным затратам на водоподготовку или мириться с недобором продукции и изменением ее качества (как правило, ухудшением) Загрязненность водоемов приводит к повышенной заболеваемости населения и к увеличению расходов в сфере здравоохранения, к снижению рекреационной ценности природных комплексов По оценкам ВНИИводгео, ежегодная величина экономического ущерба от

загрязнения водных ресурсов страны во второй половине 1980-х гг составляла 7-8 млрд руб Расчет экономического ущерба от сброса сточных вод в водные объекты, проведенные для Комплексной программы научно-технического прогресса на 1991 – 2010 гг., с использованием отчетных и прогнозных данных о выносе загрязняющих веществ промышленностью, коммунальным и сельским хозяйством, поверхностным стоком с территорий городов и сельскохозяйственных угодий, соответствует приведенной выше величине ущерба Расчет выполнен согласно «Временной типовой методике определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды»

Проведенные расчеты заставляют очень серьезно оценивать эколого-экономическую эффективность всех мероприятий, направленных на охрану водных объектов от загрязнений, и всю систему использования водных ресурсов страны В связи с этим роль методик определения экономической эффективности водоохранных мероприятий и оценок экономического ущерба от использования водных ресурсов неизмеримо возрастает Речь идет о выборе наиболее рационального способа водообеспечения в сложнейший период преобразований производств при катастрофическом состоянии многих рек, озер и даже морей

11.6.2. Стимулирование водоохранной деятельности

Введение платы за воду, забираемую промышленными предприятиями из водохозяйственных систем, явилось началом перехода к экономическим методам стимулирования водоохранной деятельности Однако, как показала практика, влияние этой меры на хозяйственную деятельность предприятий пока незначительно Данные же американских авторов показывают, что высокие цены на воду стимулируют внедрение систем оборотного водоснабжения

Весьма эффективной мерой является плата за сброс сточных вод в природные водоемы Впервые эта мера была введена в ФРГ в бассейне р Рур, затем в Нидерландах и во Франции К числу параметров, на основании которых определяется размер платы, можно отнести ХПК, БПК, содержание взвешенных веществ, азота Наблюдается тенденция к расширению перечня контрольных параметров и к увеличению платы за воду Во Франции плата за сброс сточных вод поступает в управления речными бассейнами, в Нидерландах – в министерство водного хозяйства Объем сточных вод определяется по расчетным или фактическим данным Поступающие деньги используются на финансирование отраслевых и региональных программ по борьбе с загрязнениями и на покрытие административно-управленческих расходов

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Алферова Л.А., Зайцев В.А., Нечаев А.П. Использование воды в безотходном производстве//Итоги науки и техники (Сер Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов) Т. 29 М.: ВИНИТИ, 1990 196 с

Алферова Л.А., Нечаев А.П. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов Под ред С В Яковлева. М · Стройиздат, 1984 272 с

Беличенко Ю.П., Гордеев Л.С., Комиссаров Ю.А. Замкнутые системы водообеспечения химических производств. М.· Химия, 1996 272 с

Беличенко Ю.П.,Швецов М.М. Рациональное использование и охрана водных ресурсов. М · Россельхозиздат, 1986 306 с.

Белогуров В.П., Василенко С.Л. Статистические модели процессов изменения качества воды в водотоках //Управление качеством природных вод Харьков, 1980 С 61-69

Береза А.И., Беличенко Ю.П. Очистка и использование поверхностного стока с территорий промышленных предприятий. М.: ВЗИИТ, 1985 48 с

Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом М : Наука, 1979 119с

Галустов В.С., Беличенко Ю.П.,Чуфаровский А.И. Двухконтурные теплообменные аппараты. М · ЦИНТИнефтемаш, 1988. 44с

Глезин И.Л., Петров В.Н., Тимофеев Г.А. Пиролиз твердых отходов нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности М ЦНИИТЭнефтехим, 1981 58с.

Гордин И.В. Технологические системы водообработки. Л Химия, 1987 264 с.

Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. М · Химия, 1986 272 с

Евилевич А.З. Утилизация осадков сточных вод М Стройиздат, 1988 146 с

Евстратов В.Н., Киевский М.И., Беличенко Ю.П. Внедрение безотходной технологии доочистки сточных вод. М ВНИИИС, 1980 42 с

Есенов Е.К. Разработка принципов моделирования оптимальных систем очистки сточных вод Дис.. докт. техн наук 05 17 08 М.· РХТУ им Д И Менделеева, 1994. 347 с.

Жуков А.И., Монгайт И.Л., Родзимер И.Д. Канализация промышленных предприятий Очистка промышленных сточных вод М Госстройиздат, 1962 602 с

Зиятдинов Н.Н., Емельянов В.И., Назарова Т.Г. и др. Программный комплекс расчета и оптимизации химико-технологических систем Учебное пособие. КГГУ Казань, 1996 64 с

Зиятдинов Н.Н. Системный подход к повышению эффективности биологической очистки промышленных сточных вод Автореф дис докт техн наук, Казань, 2001 39с
Когановский А.М., Клименко Н.А, Левченко Т.М. и др. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении М Химия, 1983 287 с
Колодин М.В. Экономика опреснения воды М Наука, 1985 128 с
Кучеренко Д.И., Гладков В.А. Оборотное водоснабжение М Стройиздат, 1980 170с
Ласкорин Б.Н., Громов Б.В., Цыганков А.П., Сенин В.Н. Безотходная технология в промышленности М Стройиздат. 1986 156 с
Лукиных Н.А., Липман Б.Л., Кришгул В.П. Методы доочистки сточных вод М Стройиздат, 1974 136 с
Островский Г.И., Бережинский Т.А. Оптимизация химико-технологических процессов Теория и практика Серия " Химическая кибернетика" М Химия, 1984 240 с
Островский Г.И, Волин Ю.М. Моделирование сложных химико-технологических схем М Химия 1975 312с
Примак А.В, Кафаров В.В., Качиашвили К.И. Системный анализ контроля и управления качеством воздуха и воды Киев Наукова думка, 1991 360 с
СНиП 2.04.02-84 М Стройиздат, 1985 134 с
Сорокин Я.Г Безотходное производство в нефтеперерабатывающей промышленности М Химия. 1983 200с
Тертугов Г.В Очистка сточных вод и технологических жидкостей машиностроительных предприятий с использованием неорганических мембран М Издат центр РХТУ им Д.И Менделеева, 2000 95 с
Технические записки по проблемам воды ("Дегремон") Пер с англ В 2 т М Стройиздат, 1983 320 с
Тютков О.В Оптимизация планирования водного хозяйства промышленных районов М Наука, 1985 120 с
Черкинский С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы М Стройиздат, 1971 830 с
Шабалин А.Ф. Оборотное водоснабжение промышленных предприятий М Изд-во литературы по строительству, 1972 296 с
Яковлев С.В, Карелин Я.А., Ласков Ю.М., Воронов Ю.В. Очистка производственных сточных вод М Стройиздат, 1979 320 с
Яковлев С.В., Прозоров И.В., Иванов Е.Н., Губий И.Г. Рациональное использование водных ресурсов// М Высш шк., 1991 400 с

Ю. А. Комиссаров
Л. С. Гордеев
Нгуен Суан Нгуен

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Авторы:

Юрий Комиссаров *– доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Известен своими трудами в области системного анализа и математического моделирования процессов и аппаратов химической технологии. Имеет более 150 научных публикаций, из них 4 монографии.*

Лев Гордеев *– Заслуженный деятель науки РФ, Почетный химик СССР, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Известен своими трудами в области математического моделирования, оптимизации и автоматизации жидкофазных химических и биотехнологических процессов. Имеет более 250 научных публикаций, из них 7 монографий.*

Нгуен Суан Нгуен *– доктор технических наук, профессор, генеральный директор UCI (объединение научных исследований и производств химической технологии) и CTC (консультативный центр по обучению и совершенствованию технологий) г. Ханой, Вьетнам. Известен своими трудами в области системного анализа процессов и аппаратов химической технологии. Имеет 88 научных публикаций, из них 2 монографии.*