

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ХИМИИ

Выпуск 61

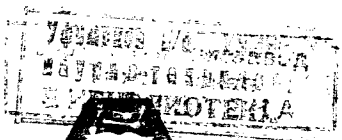
608.34  
Б.53

*Г. П. Беспямятнов · К. К. Богушевская · Л. А. Зеленская  
В. Ф. Плехоткин · Г. Г. Смирнов*

ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Под редакцией канд. техн. наук К. К. БОГУШЕВСКОЙ

42916



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»  
Ленинградское отделение  
1969

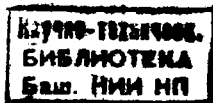
*Беспамятиса Г. П., Богущевская К. К., Зеленская Л. А., Плехоткин В. Ф., Смирнов Р. Р. Термические методы обезвреживания промышленных отходов. ГИИХ, вып. 61. Изд-во «Химия», 1969 г., 112 стр., 17 табл., 85 рис.*

В книге рассматриваются результаты практического применения термического метода для обезвреживания твердых, жидких, газообразных промышленных отходов в СССР и за рубежом; дано описание технологических схем, установок и конструкции основных аппаратов; освещены вопросы выбора установок в зависимости от вида отходов и экономики процесса.

В книге приведена отечественная и зарубежная библиография (по 1967 г. включительно).

Книга предназначена для научных работников проектных и научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и инженерно-технического персонала предприятий химической, нефтеперерабатывающей, нефтегазовой, медицинской, легкой промышленности и других отраслей народного хозяйства, а также может служить пособием для студентов технических вузов.

33797



## ВВЕДЕНИЕ

В связи с бурным ростом народного хозяйства и особенно отраслей, в которых широко применяются методы химической технологии (химической, металлургической, коксохимической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, целлюлознобумажной и т. д.), резко возросло количество промышленных отходов, требующих специальной очистки. Своевременное удаление и обезвреживание промышленных отходов имеет большое государственное значение. Это способствует уменьшению потерь производства, улучшению состояния водоемов и воздушного бассейна.

Все промышленные отходы делятся на три основные группы:

- 1) жидкие;
- 2) твердые;
- 3) газообразные.

В зависимости от количества отходов и их физико-химических свойств применяются различные методы очистки: механические, сорбционные, химические, биологические, термические, а также комбинированные.

*Механический метод* применяется для очистки жидких и газообразных отходов от грубодисперсных примесей с помощью специальных аппаратов (ловушек, контактных фильтров, осветителей, отстойников, циклонов и т. д.). Выделенные твердые примеси, опасные для здоровья людей, подвергаются затем либо захоронению, либо сжиганию.

*Сорбционный метод* очистки заключается в том, что на поверхности некоторых активных материалов (например, активированного угля) происходит поглощение минеральных или органических продуктов. Этот метод позволяет очищать воздух и жидкие отходы от вредных примесей. При использовании ионообменных смол получаются концентрированные растворы, содержащие большое количество органических и минеральных продуктов в регенерате.

Полученные таким образом концентрированные растворы могут либо повторно использоваться с целью извлечения из них ценных продуктов, либо уничтожаются термическим способом.

На эффективность очистки влияет целый ряд факторов, из которых следует отметить состояние среды, наличие взвешенных частиц, соли тяжелых металлов.

Недостатком этого метода очистки является периодическое получение большого количества твердых продуктов, которые из-за трудности специальной обработки часто приходится сжигать или подвергать захоронению.

При *химическом методе* очистки к отходам добавляются различные реагенты, вступающие во взаимодействие с теми или иными примесями. В результате протекающих химических реакций получаются новые соединения, уже не оказывающие токсического действия на окружающую среду. Наиболее часто применяются реакции окисления и восстановления. Самостоятельное применение химического метода часто не дает полной очистки сточных вод от органических и неорганических продуктов. Наиболее целесообразно применить сорбционный и химический методы для промышленных сточных вод, содержащих органические и минеральные вещества в концентрациях не более 1—2 г/л, и газов, содержащих не более 100 мг/л токсичных веществ.

*Биологический метод*, заключающийся в разрушении органических продуктов в результате деятельности микроорганизмов, применяется для очистки сточных вод, содержащих незначительные количества органических и минеральных веществ (менее 0,5—1 г/л). Данный метод используется в том случае, если точно известен состав сточных вод и токсичное действие его продуктов на биохимический процесс, а также если установлена возможность биохимического окисления находящихся в них органических продуктов. Однако целый ряд промышленных отходов (в основном от химических производств) из-за сложного состава и разнообразия химических веществ, относящихся к различным классам соединений, не удается обезвредить полностью ни одним из рассмотренных методов, кроме термического.

Именно поэтому термический метод, как в нашей стране, так и за рубежом, получил широкое распространение. По этому методу все органические вещества полностью окисляются кислородом воздуха при высокой температуре до нетоксичных соединений. В результате выделяются минеральные продукты в виде золы или гранул. Термический метод обезвреживания производственных отходов в зависимости от условий режима окисления, технологического оформления процесса и состава отходов подразделяется на ряд способов.

1) Окисление органических веществ при температуре выше 800° С и давлении ниже 2 атм кислородом воздуха (сжигание).

В зависимости от вида и состава производственных отходов процесс обезвреживания проводят:

- а) в камерных печах;
- б) в циклонных печах;
- в) в многоподовых печах;
- г) в печах с псевдоожиженным слоем;
- д) в распылительных печах.

2) Окисление органических веществ в присутствии катализаторов при температуре 100—500° С и атмосферном давлении.

3) Окисление органических веществ в присутствии катализаторов при температуре 100—500° С и давлении до 360 *атм* (каталитическое окисление).

4) Окисление органических веществ при давлении выше 2 *атм*, температуре 100—300° С и неполном испарении воды («мокрое сжигание», или процесс Циммермана).

В настоящей книге собраны и обобщены результаты практического применения термического метода для обезвреживания сточных вод, твердых и газообразных отходов.

При изложении материала нами по возможности сохранено описание процесса, как это дается в литературном источнике. В книге приведена использованная авторами литература, которая охватывает советские и зарубежные издания с 1957 г. по 1967 г.

## Глава 1

### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ТВЕРДЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, КЛАССИФИКАЦИЯ И СПОСОБЫ ИХ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ

Для правильной организации сбора, хранения и обезвреживания твердых отходов необходимо знать их состав, количество и свойства, а также факторы, влияющие на их изменения.

Все твердые отходы следует разделить на промышленные твердые отходы химических предприятий (эти отходы или токсичные соединения, или могут содержать на своей поверхности токсичные вещества) и промышленные твердые отходы нехимических производств (эти отходы не содержат токсичных веществ).

Таблица 1  
Классификация промышленных твердых отходов

	Продукты, предметы и вещества, составляющие твердые отходы
Твердые отходы нехимических производств: проектно-конструкторские организации, административные службы хозяйственные и строительные цеха котельные, ТЭЦ санитарная служба механические цеха и предприятия	Бумага, стекло, древесина Древесина, древесные стружки и опилки, строительный мусор, картон, бумага Зола, остатки твердого топлива Перевязочный материал, стекло, бумага, гипс, кости, мусор Древесина, ветошь, мусор
Твердые отходы химических производств (химические цеха и предприятия)	Ветошь, пропитанная химическими веществами; активированный уголь, пониты и другие адсорбенты, ракушечник, шлак промышленной канализации, смолы, тяжелые металлы, хром, кальций, хлориды, сульфиды, сульфаты, целлюлозное и бумажное волокно и другие продукты

Предлагаемая классификация промышленных твердых отходов представлена в табл. 1.

Если состав и свойства твердых отходов нехимических производств довольно постоянны и известны, то твердые отходы химических производств включают разнообразные вещества органического и неорганического происхождения, и по этой причине изучение их свойств и состава связано с большими трудностями.

При обследовании ряда предприятий городов Москвы и Ленинграда [1] была получена характеристика состава промышленных твердых отходов нехимических производств. Эти результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Характеристика промышленных твердых отходов нехимических производств

Вид отходов	Суточное накопление, т	
	Москва	Ленинград
Древесина (опилки, обрезки, стружка, деревянная упаковка, рогожа и т. д.)	940	484
Бумага (промасленная, пергамент, картон, шпунли, парафинированная)	163	52
Текстильные отходы (промасленная ветошь, ворс, концы, пух, вата)	149	63
Кожа, шерсть	36	19
Резина, клеенка	101	90
Пластмассы	9	3
Аспириационная пыль (кожи, пера, текстиля и пр.)	35	4
Мездра	70	15
Смоли	3	—
Сажа	0,3	—
Зерно, крупка, хмель	10	—
Мясокостные отходы	32	4,2
Стекло	10	5
Горелая формовочная земля	919	200
Шлаки, зола, абразивы	506	23
Шламы, флюсы, осадки фильтрования хозяйственно-фекальных вод	35	114
Прочие (смет, строительный мусор)	582	673
Известковые отходы, шамотная масса	—	9,8
Всего	3500,3	1759,0

Средняя влажность твердых отходов, перечисленных в табл. 2, составляет  $W^p$  — 30—40% при зольности  $A^p = 10—15\%$  и теплоте сгорания  $Q_p^p = 1500—2500$  ккал/кг.

Содержание основных соединений, определяющих химический состав твердых отходов нехимических производств колеблется в широких пределах: количество органических веществ (по сухому

веществу) изменяется от 40 до 80%; азота — от 0,7 до 3%, фосфора — от 0,4 до 1%, калия — от 0,4 до 0,7%, серы — от 0,2 до 0,8%. Для обезвреживания таких отходов предложены следующие методы (табл. 3).

Таблица 3

Методы обезвреживания ПТО

№ по пор.	Метод обезвреживания	Вид твердых отходов	
		нехимические	химические
1	Захоронение в шахтах, усовершенствованных свалках, карьерах; сброс в море	Возможно	Недопустимо из-за устойчивости токсичных соединений
2	Сжигание всей массы *	»	Возможно только для продуктов, не содержащих легкоплавких материалов
3	То же **	»	Возможно
4	Использование органической части для переработки в органические удобрения, биотопливо и вторичное сырье для промышленности	»	Невозможно из-за токсичности соединений

\* Тепло используется для энергетических целей, а образующаяся зола и шлак применяются для производства строительных материалов.

\*\* Это основной метод обезвреживания химических и нехимических твердых отходов.

В СССР и за рубежом в крупных городах и на промышленных предприятиях широкое распространение получили методы 2 и 3 (табл. 3).

В зависимости от свойств производственных твердых отходов решается вопрос о выборе и применении той или иной конструкции печи сжигания, но все они должны отвечать следующим основным требованиям:

1) хорошее перемешивание твердых отходов в процессе горения для лучшего проширокования кислорода воздуха в массу отходов и возможно более полного процесса окисления органической части твердых отходов;

2) сохранение и поддержание достаточно высоких температур, гарантирующих полное сгорание органических составляющих твердых отходов, надежное воспламенение и устойчивое горение твердых промышленных отходов;

3) полное обезвреживание минеральной части промышленных отходов;

4) простота конструкции и удобство обслуживания.

Сжигание производственных твердых отходов может осуществляться в печах различной конструкции. Наиболее широкое применение для сжигания твердых отходов химических и нехимических производств в период до 1965 г. нашли камерные, барабанные и многоподовые печи, а с 1966 г. начали широко использоваться печи с псевдоожиженным слоем. Отличительной особенностью сжигания твердых отходов химических производств является более высокая температура процесса, чем при сжигании твердых отходов нехимических производств.

Для сжигания твердых промышленных отходов в камерных печах и печах с псевдоожиженным слоем характерным является наличие нескольких температурных зон:

- 1) подсушивания;
- 2) подготовки твердых отходов к сжиганию;
- 3) зажигания;
- 4) горения;
- 5) дожигания;
- 6) выжигания.

Для подсушивания твердых отходов с целью уменьшения влажности используются дымовые газы с температурой не ниже  $700^{\circ}\text{C}$  для твердых отходов нехимических производств и с температурой  $800\text{--}1500^{\circ}\text{C}$  для твердых отходов химических производств. Дымовые газы с указанными температурами используют для того чтобы избежать появления неприятных запахов легколетучей части органических веществ и выделяющихся при этом токсичных продуктов их распада.

Соотношение между сравнительной степенью запаха дымовых газов и температурой дезодорирующей зоны для нескольких типов осадков приведены на рис. 1 [2].

В зоне подготовки твердых отходов к зажиганию отгоняются оставшиеся 25—30% летучих органических продуктов, температура слоя при этом достигает температуры воспламенения отдельных составляющих твердых отходов ( $240\text{--}500^{\circ}\text{C}$ ). Продукты возгонки сгорают в самом слое, в то время как оставшиеся продукты лежат на колосниковой решетке или находятся в движении (псевдоожиженный слой), не загораясь. Если чрезмерное ускорение этого процесса в камерных печах приводит к быстрому выходу продуктов возгонки и образованию корок на поверхности слоя твердых отходов, препятствующему нормальному процессу горения, то в случае

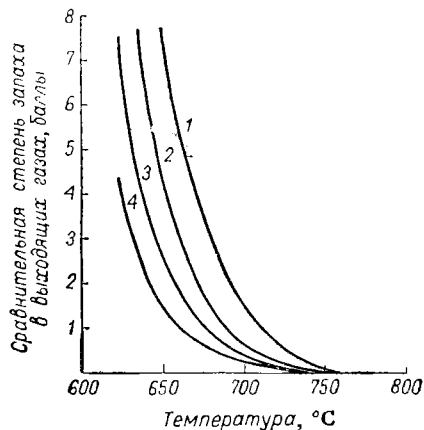


Рис. 1. Соотношение сравнительной степени запаха выходящих газов и температуры дезодорирующей зоны для нескольких типов осадков:

1 — анаэробно-сброженный; 2 — сырой химический; 3 — сырой; 4 — сброженный и отстоенный.

псевдооживленного слоя коркообразования не происходит в результате непрерывной циркуляции отдельных частиц, нарушающих процесс образования корки.

При сжигании твердых отходов в камерных и барабанных печах в основном происходит верхнее зажигание за счет открытого факела, а в печах с псевдооживленным слоем — нижнее зажигание за счет высокой температуры газов. С целью выравнивания слоя, предотвращения образования корок и перемещения слоев колосниковые решетки камерных печей устанавливаются наклонно, либо они устраиваются уступом, либо им сообщается возвратно-поступательное движение.

Горение твердых отходов начинается, когда температура слоя достигает примерно  $600^{\circ}\text{C}$ . Горение в псевдооживленном слое протекает равномерно и полно, поскольку такой слой обеспечивает хорошую теплопередачу по всей зоне.

В камерной печи тепло распространяется в слое неравномерно, поэтому подаваемый воздух (дутье) часть слоя проходит быстрее, вынося из печи наиболее летучие частицы (золу и т. д.), в то время как в другой части слоя воздуха недостаточно для полного сгорания. В этой зоне необходимо сильное и постоянное перемешивание.

Интенсивное перемешивание необходимо и в остальных зонах дожигания и выжигания, — чтобы не допустить образования плавов и забивки решетки плавами. Средняя температура в зоне дожигания  $1100$  (твердые отходы нехимических производств) и  $1200\text{—}1500^{\circ}\text{C}$  (твердые отходы химических производств).

Сжигание производственных твердых отходов в печах с псевдооживленным слоем не носит столь выраженный характер, как в случае сжигания в камерных и барабанных печах. В печах с псевдооживленным слоем температура практически постоянна и соответствует температуре зоны выжигания.

### **Обезвреживание отходов в камерных печах**

На рис. 2 представлена схема камерной печи с неподвижной ступенчатой колосниковой решеткой [1].

С помощью внутризаводского транспорта твердые производственные отходы из бункера 1 через шахту 2 попадают на наклонную или ступенчатую колосниковую решетку 8. Слой твердых отходов 9 под действием собственного веса медленно сползает по решетке к месту выгрузки зоны. Органическая часть твердых отходов частично сгорает в слое, а частично над слоем 6, куда подается дополнительно вторичный воздух через форсунку 3. Основное количество воздуха 7, подается под решетку. Несгоревшие органические продукты вместе с дымовыми газами проходят огнеупорную насадку 4, предназначенную для турбулизации газового потока и улучшения процесса горения оставшейся части органических веществ, и дожигаются в камере 5.

Удаление золы из топки — ручное. Производительность печи 0,3 т/ч. Печи подобной конструкции работают на некоторых предприятиях города Москвы.

На рис. 3 дана схема камерной печи с неподвижной решеткой для сжигания корки, образующейся на поверхности метантенков и отстойников (США). Производительность печи 45 кг/ч [3, 4].

Насосом 7 корка подается в печь через распылитель 1. Корка самотеком по решетке 3 поступает в зону золоудаления. Для полного дожигания органических веществ в печи в трех зонах установлены

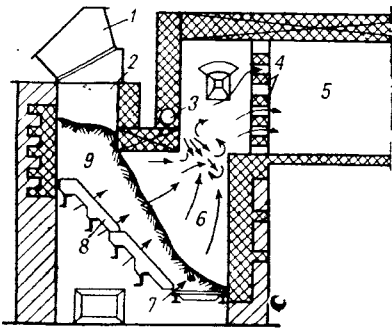


Рис. 2. Схема камерной печи с неподвижной колосниковой решеткой:

1 — бункер; 2 — шахта; 3 — форсунка для подачи вторичного воздуха; 4 — огнеупорная насадка; 5 — камера дожигания (вторая ступень топки); 6 — первая ступень топки; 7 — воздух; 8 — наклонная колосниковая решетка; 9 — слой.

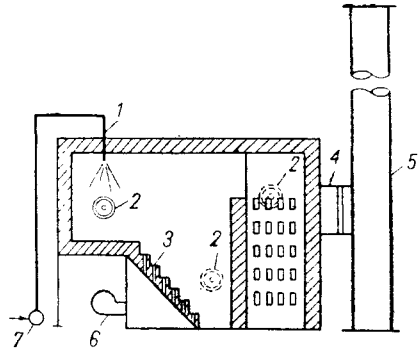


Рис. 3. Камерная печь для сжигания корки, образующейся на поверхности метантенков:

1 — распылитель; 2 — газовая горелка; 3 — решетка; 4 — дымоход; 5 — дымовая труба; 6 — вентилятор; 7 — насос.

газовые горелки 2. Продукты горения через дымовую трубу 5 выбрасываются в атмосферу. Печь подобного типа производительностью 675 кг/ч, считая на сухое вещество, используется с 1958 г. для сжигания шлама после фильтрования [5].

Печи с горизонтальной решеткой, устанавливаемой под углом 25°, разработанные М. Х. Детрик, были применены для сжигания отбросов и осадков сточных вод в США. Производительность печей 500 т/сутки [6].

Камерная печь с переталкивающей решеткой фирмы «Фон-Ролл» показана на рис. 4. Твердые отходы с помощью автотранспорта доставляются к разгрузочному помещению печи 1. Отходы из бункера для мусора 2 мостовым краном с грейферным захватом 3 подаются на вибрационный желоб 4, который равномерно подает материал на решетку 12 для подсушивания. Подсушка происходит за счет горячего дутья топочными газами вместе с воздухом. Подсушенные и частично воспламенившиеся отходы пересыпаются на главную решетку 11, которая, как и подсушивающая, является наклонно-переталкивающей. Решетки расположены уступом и работают

в одном направлении. Продукты неполного сгорания твердых отходов дожигаются на решетке 10 и через провальную шахту 9 попадают в канал 15, где охлаждаются. Охлажденный шлак с помощью цепного транспортера 14 подается в бункеры, которые периодически очищают, а шлак вывозят. Нагрев дутьевого воздуха осуществляется с помощью горелки 13. Топочные газы, проходя через пароперегреватель 5 и испаритель 8, отдадут свое тепло и через канал 7

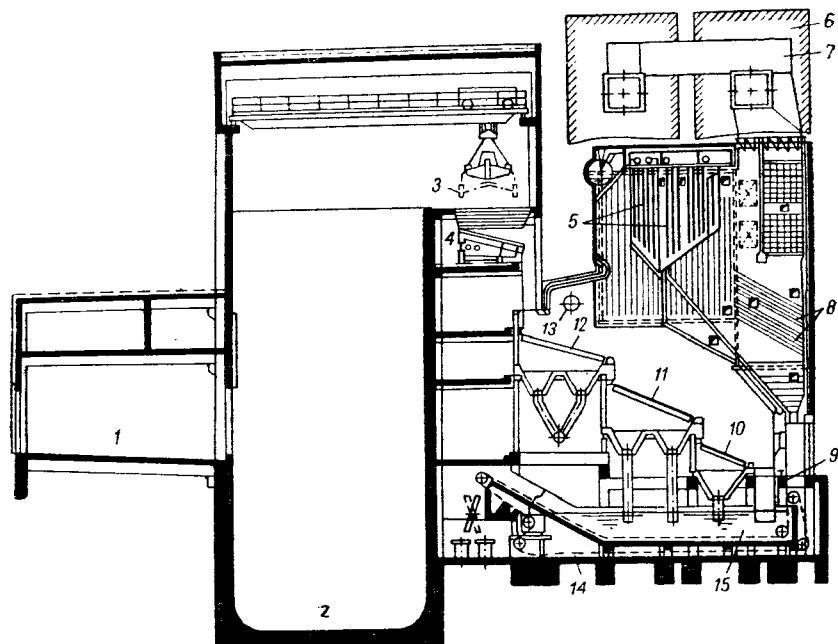


Рис. 4. Модификация печи фирмы «Фон-ролл» (Франкфурт-на-Майне, Женева): 1 — разгрузочное помещение; 2 — бункер для мусора; 3 — грейфер; 4 — вибрационный желоб; 5 — пароперегреватель; 6 — электрофильтр; 7 — канал дымовых газов к электрофильтрам; 8 — испаритель; 9 — провальная шахта; 10 — дожигательная решетка; 11 — главная решетка; 12 — решетка для предварительной подсушки; 13 — нефтяная горелка; 14 — цепной транспортер; 15 — канал для шлака.

поступают в электрофильтры 6 на очистку от пылевидных твердых частиц. Очищенные топочные газы с помощью дымососа выбрасываются через трубу в атмосферу [1].

Печи конструкции швейцарской фирмы «Фон-ролл» (г. Цюрих) построены в Швейцарии (Берн, Женева, Цюрих, Лозанна), Австрии (Вена) [7], Финляндии (Хельсинки), Японии (Осака), ФРГ (Кёльн, Гамбург, Бохум, Ингельхейм, Ганновер, Франкфурт-на-Майне и др.). Производительность этих печей 100—300 т/сутки [8].

Печи подобной конструкции нашли применение для сжигания мусора в городе Клервотер (США) [9]. Схема такой печи приведена на рис. 5.

Камерная печь, разработанная фирмой «Мартин» в Мюнхене [1], показана на рис. 6. Достоинства ее в преимуществах обратно-переталкивающей решетки, колосники которой совершают возвратно-поступательные движения в направлении, противоположном наклону решетки и движению отходов. При каждом ходе колосников под слой вводится порция горящего материала, при этом создаются очаги нижнего зажигания, слой перемешивается, взрыхляется и сгорает.

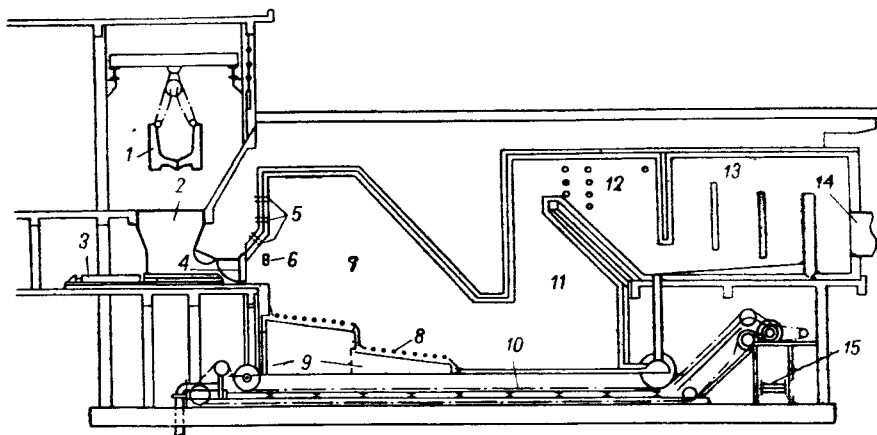


Рис. 5. Схема печи для сжигания твердых отходов:

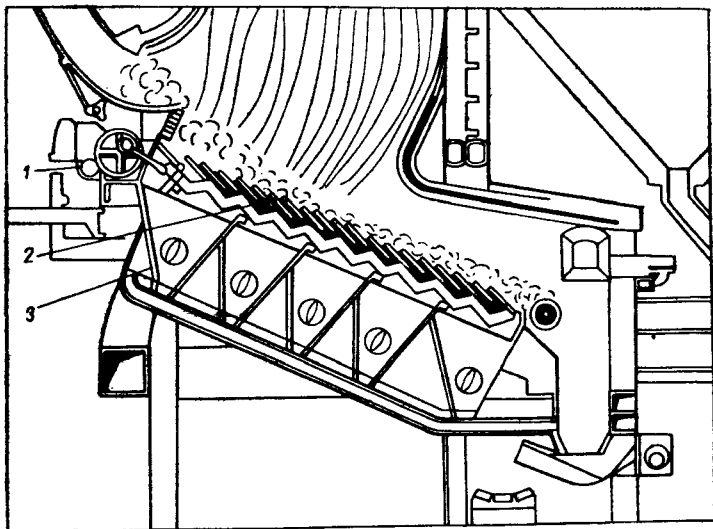
1 — подъемный кран и абордажный крюк; 2 — загрузочный бункер; 3 — плужерный питатель; 4 — загрузочный люк; 5 — летки перегретого воздуха; 6 — горелка; 7 — камера сгорания; 8 — стокер (механическая топка); 9 — форсунка для ввода воздуха в камеру сгорания; 10 — охлаждающий бункер и конвейер для отвода шлама; 11 — камера сгорания; 12 — оросительная камера; 13 — отстойная камера; 14 — затвор; 15 — поперечный конвейер.

Производительность печи регулируется скоростью решетки и ее шириной. Толщина слоя на решетке измеряется с помощью подпорного вальца с регулируемым приводом, расположенного в конце решетки. К достоинствам печей фирмы «Мартин» следует отнести отказ от дожигательной решетки. Печи, имеющие одну решетку, компактны и не требуют большой строительной высоты. Шлаки выходят через ванну и выносятся наружу ленточным транспортером. Так, печь с шириной решетки 10 и 12 м длиной имеет производительность 1200 т/сутки.

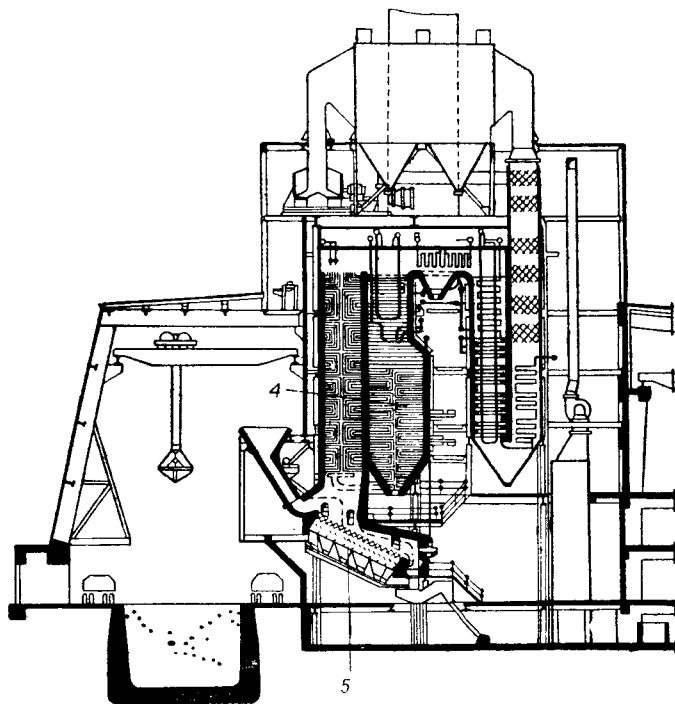
В больших установках обезвреживания твердых отходов применение мощных печей фирмы «Мартин» дает значительную экономию в капитальных затратах и сроках строительства. Печи фирмы «Мартин» работают в Бразилии (Сан-Пауло), Голландии (Роттердам) [7], ФРГ (Мюнхен, Штутгарт), Швейцарии (Цермат), Франции (Париж).

На рис. 7—9 показаны конструкции печей с механической топкой [5, 9], применяемые в США для быстрого, полного и непрерывного сжигания горючих отходов.

*a*



*б*



**Рис. 6. Установка для сжигания твердых отходов фирмы «Мартин».**

*a*—общий вид обратноперегревающей решетки; *б*—общий вид установки:  
*1* — привод решетки; *2* — колосники; *3* — зонное дутье; *4* — промоточный котел с пылеугольной топкой; *5*—обратноперегревающая решетка.

На рис. 10 изображена печь с вальцовой решеткой фирмы «Дюссельдорф», разработанная в ФРГ [1].

Через шахту 1 и питатель 2 твердые отходы слоем 1,2 м поступают в топку. Колосниковая решетка образована несколькими расположенными уступом цилиндрическими полыми вальцами. При вращении валцов первоначальный слой твердых отходов уменьшается за счет сдавливания между вальцами, после чего отходы движутся потоком небольшой толщины. Движение валцов осуществляется приводом 3. Твердый материал при переходе с вальца на валец полностью переворачивается, и каждый раз образуются

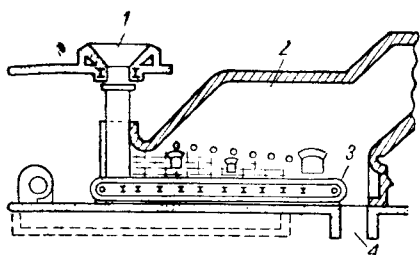


Рис. 7. Общий вид установки с одной механической топкой установка производительностью до 50 т/сутки:

1 — люк для загрузки отходов; 2 — камера сжигания; 3 — транспортер; 4 — люк для шлама.

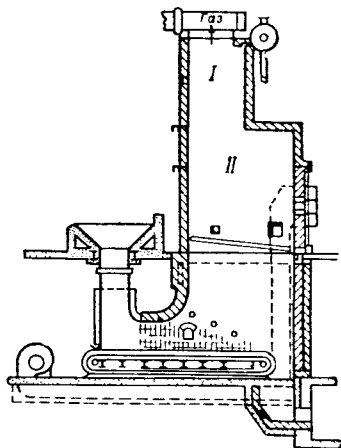


Рис. 8. Общий вид установки с одной механической топкой и с дополнительным бойлером для нагревания воды с целью получения пара для энергетических целей и отопления (без специальных затрат):

I — конвективная поверхность; II — излучающая поверхность.

новые очаги нижнего зажигания. Толщина слоя регулируется в зависимости от свойств ПТО изменением скорости вращения каждого вальца в отдельности. Для обжига шлака применяется выжигательная цепная решетка 5. Топка снабжена периодически работающей мазутной горелкой 7. С целью использования тепла печь снабжена котлом-утилизатором 6.

К. п. д. вальцовой решетки на 30% выше наклонно-подталкивающих решеток; низкое содержание золы в топочных газах облегчает их очистку. Печи с топками такой конструкции построены в Дюссельдорфе и Штутгарте (ФРГ).

Использование тепла отходящих газов для подсушки твердых отходов, поступающих на сжигание, отражено в схеме [8, 10] (рис. 11).

Подсушенные отходы из бункера 3 с помощью питателя 4 подаются в камерную печь 5. Дымовые газы и часть несгоревших отходов

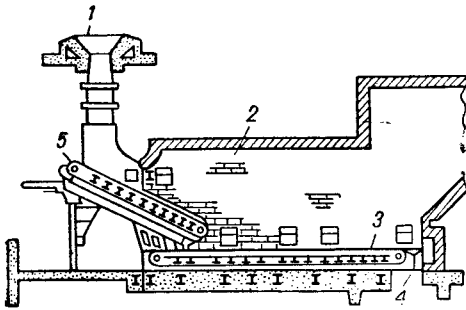


Рис. 9. Общий вид установки с двумя механическими топками (установка рекомендуется для больших городов и крупных предприятий. Отходы перед сжиганием на горизонтальной решетке предварительно подсушиваются на наклонной решетке):

1 — люк для загрузки отходов; 2 — камера сжигания; 3 — транспортер в зоне сжигания; 4 — люк для шлама; 5 — транспортер в зоне подсушивания.

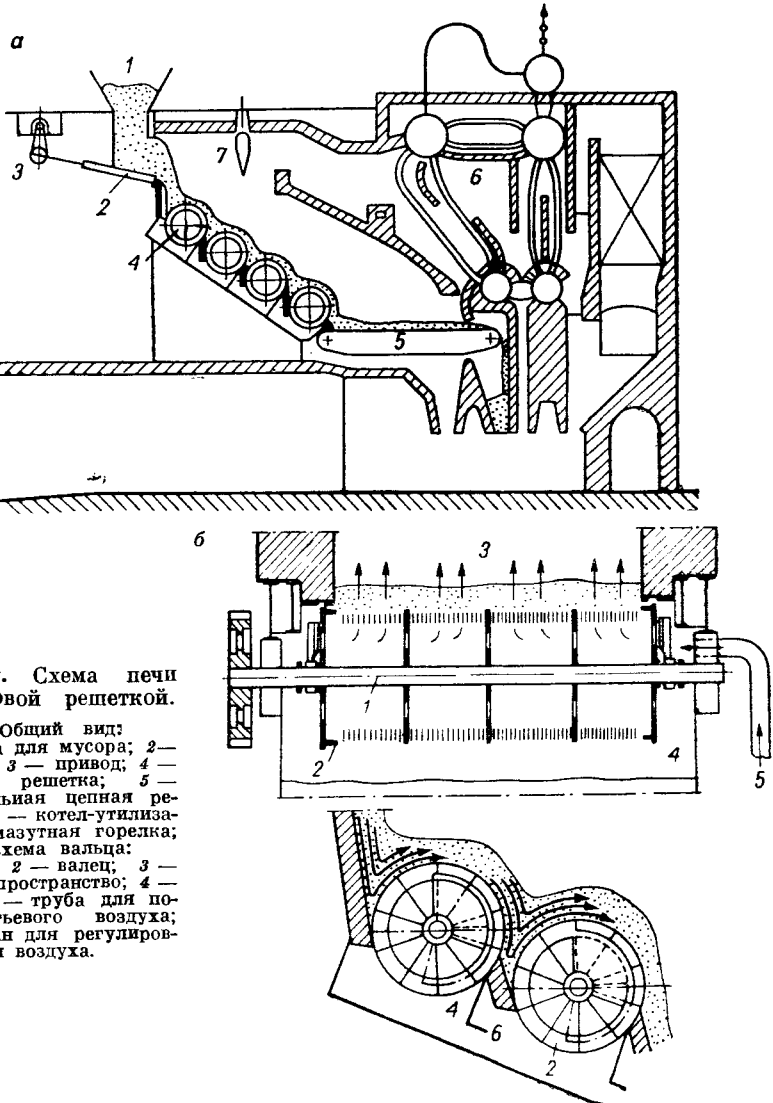


Рис. 10. Схема печи с вальцовой решеткой.

а — Общий вид:

1 — шахта для мусора; 2 — питатель; 3 — привод; 4 — вальцовая решетка; 5 — выжигательная цепная решетка; 6 — котел-утилизатор; 7 — мазутная горелка;

б — схема вальца:

1 — вал; 2 — валец; 3 — топочное пространство; 4 — кожух; 5 — труба для подачи дутьевого воздуха; 6 — клапан для регулировки воздуха.

поступают в барабанную вращающуюся сушилку 9, куда через патрубок 8 из бункера 7 подаются влажные отходы или сток, содержащий приблизительно 30% твердых веществ. Подсушенные отходы уносятся газами в циклон 10, где отделяются и с помощью воздушного потока, создаваемого вентилятором 11, по трубе 6 поступают в циклон 1. Отходящие газы из циклона 10 выбрасываются в атмосферу. Подсушенные отходы из циклона 1 через затвор 2 направляются в бункер 3, а из него на сжигание.

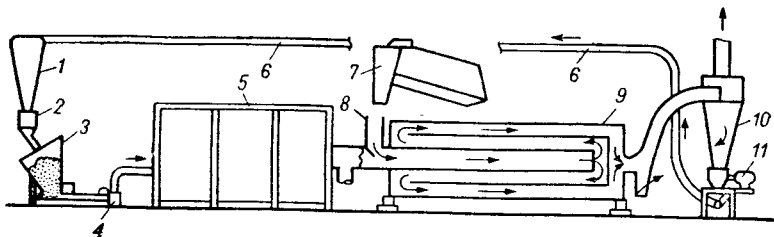


Рис. 11. Схема установки по обезвреживанию твердых отходов с использованием тепла отходящих газов:

1 — циклон; 2 — затвор; 3 — бункер; 4 — питатель; 5 — камерная печь; 6 — труба; 7 — загрузочный бункер; 8 — патрубок; 9 — барабанная сушилка; 10 — циклон; 11 — вентилятор.

49916  
В последнее время разработаны конструкции камерных печей, позволяющих обезвреживать твердые отходы [11—15], и при этом утилизировать находящиеся в них ценные продукты.

### Сжигание отходов в многоподовых печах

Большое распространение для сжигания осадков сточных вод (бытовых и промышленных) в США получили многоподовые печи [16—23]. Типовая схема многоподовой печи [20] приведена на рис. 12.

Фильтровальный кек, отбросы с решеток, крупка и другие твердые отходы транспортером 8 или эжекторами подаются через загрузочный люк в печь 5. Многоподовая печь состоит из стального цилиндрического жаростойкого корпуса, внутри которого размещены одна над другой топки. Число топок обычно колеблется от 4 до 8.

В центре печи находится вращающаяся ось, к которой крепятся лопасти для перемешивания осадка. Центральная ось и лопасти — полые, они охлаждаются воздухом, подаваемым вентилятором 10, расположенным у данной части печи, вблизи от оси. Влажный продукт вращающимися лопастями перемещается из топки в топку, навстречу выходящим дымовым газам. За счет тепла отходящих газов происходит подсушивание твердого осадка. Для зажигания осадка используется газ. Зола через выгрузочный люк в нижней части печи поступает в бак с водой 11, откуда насосом для золы 12 по трубопроводу 13 подается на фильтрование. Отфильтрованная



зола используется как удобрение или выбрасывается в отвал. Вода с фильтров возвращается обратно в бак 11 по трубопроводу 14.

Газы, охлажденные при контакте с влажным осадком, поступают в скруббер 2, где очищаются от частиц золы и охлаждаются водой,

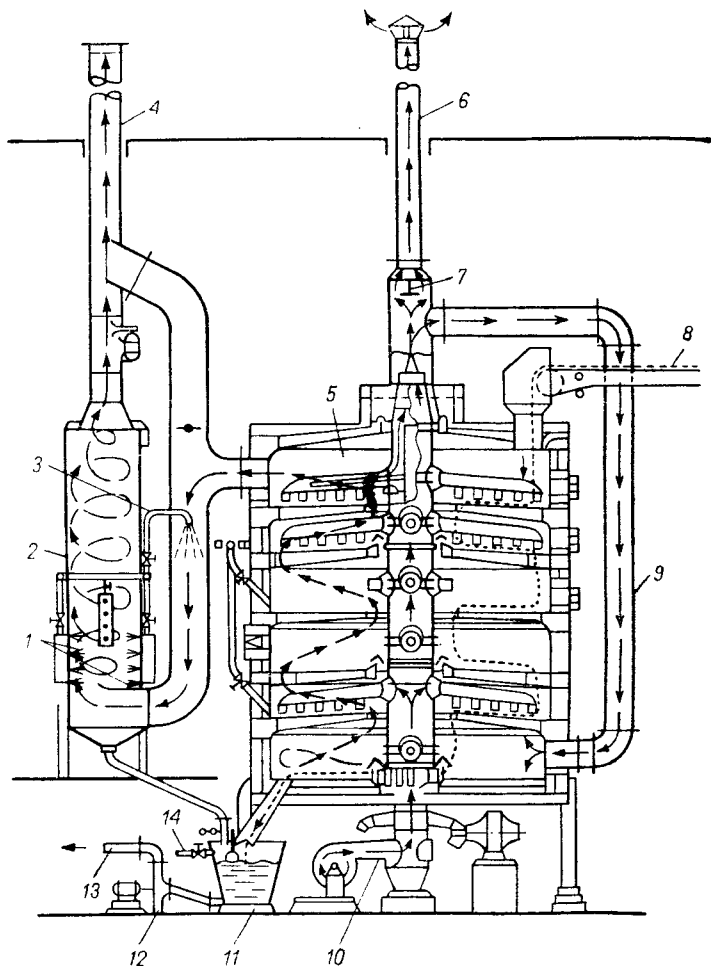


Рис. 12. Схема многоподовой печи «Херешоф» для сжигания осадков:

1 и 3 — форсунки; 2 — скруббер; 4 — дымовая труба; 5 — топочное пространство печи «Херешоф»; 6 — труба для отбросного воздуха; 7 — заслонка; 8 — транспортер; 9 — рециркуляционная труба; 10 — вентилятор; 11 — бак с водой для золы; 12 — насос для золы; 13 — отводной трубопровод для золы; 14 — трубопровод для оборотной воды.

поступающей в скруббер через форсунки 1 и 3. Очищенные газы выбрасываются через трубу 4 в атмосферу. Часть воздуха, используемого для охлаждения центральной оси и лопастей, возвращается по рециркуляционной трубе 9 в печь и используется для процесса

горения органических веществ, находящихся в осадке; другая часть воздуха через трубу *б* выбрасывается в атмосферу, отбор воздуха при этом регулируется заслонкой *7*.

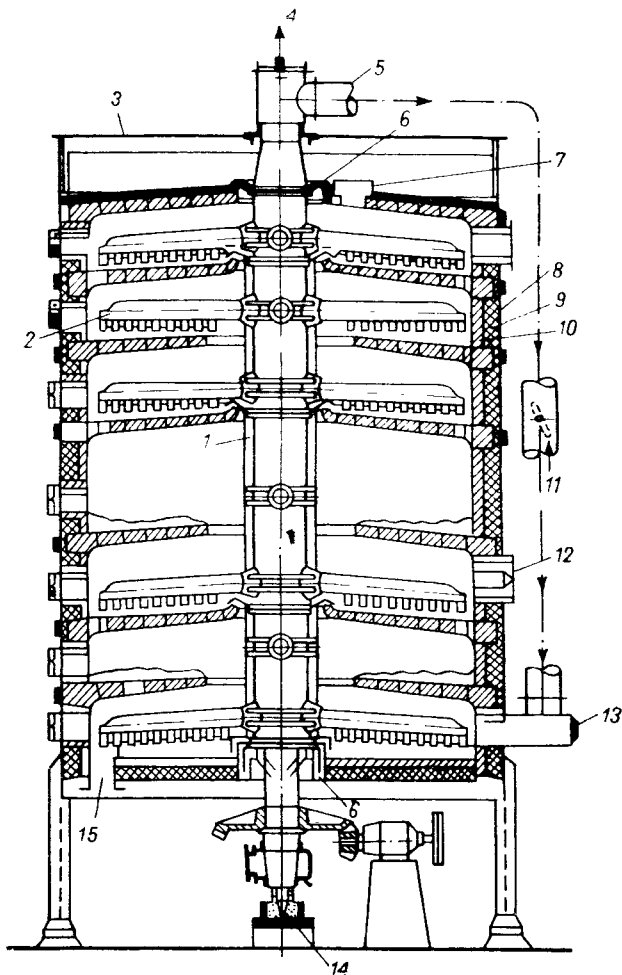


Рис. 13. Поперечное сечение многоподовой печи «Херешоф»:

1 — изоляция; 2 — лопасть; 3 — верхняя рама; 4 — труба для вывода избытка холодного воздуха в атмосферу; 5 — патрубок для возврата в топку горячего воздуха; 6 — песчаный затвор; 7 — загрузочный люк; 8 — стальная оболочка; 9 — изоляционный кирпич; 10 — огнеупорный кирпич; 11 — демпфер; 12 — топливная горелка; 13 — штуцер для возврата горячего воздуха; 14 — патрубок для ввода охлаждающего воздуха в ось и лопасти; 15 — труба для выхода золы.

Поперечное сечение многоподовой печи фирмы «Херешоф» [21] приведено на рис. 13. Производительность таких печей по твердому осадку составляет 9—300 *т/сутки*.

Рабочие температуры некоторых многопечных печей представлены в табл. 4.

Обычно во время работы многопечной печи дополнительное топливо для поддержания горения не требуется. Для вывода печи на рабочий режим ее снабжают газовыми или нефтяными горелками.

Рабочие температуры неко

Месторасположение завода	Температура выходящих газов, °С			Температура					
	максимальная	минимальная	средняя	№ 2			№ 3		
				максимальная	минимальная	средняя	максимальная	минимальная	средняя
Барбертон, Огайо	520	390	455	870	690	780	—	—	—
Торонто, Онтарио	310	250	280	460	420	440	500	480	490
Акрон, Огайо . . .	470	390	430	630	440	585	860	820	840
Ан. Арбор, Мичиган	330	260	295	530	470	500	570	480	525

Печи подобных конструкций эксплуатируются в США с 1937 г. Затраты на сжигание 1 т твердых отходов составляют в среднем 3—4 руб. [22].

В настоящее время в США работает более 130 многопечных печей. Известны четыре химических завода, имеющие такие печи для уничтожения осадков сточных вод [23].

Типовая схема обезвреживания осадков сточных вод в городе Кливленде (штат Огайо, США) с применением многопечной печи приведена на рис. 14.

Осадок сточных вод, поступающих в печь, имеет теплотворную способность около 6900 ккал/кг. Средний состав стока, поступающего в печь за 1 ч:

	кг
Горючие вещества . . . . .	832
Зола . . . . .	968
Вода . . . . .	4868

Итого: 6668

Температура в верхней топке 600° С, в нижней около 1100° С; печь рассчитана на сжигание 50 т сухого осадка в день.

Печи «Херешоф» в комбинации с камерой дополнительного сжигания золы для обезвреживания осадков сточных вод нашли применение и в Японии [24]. Схема такой установки приведена на рис. 15.

Для обезвреживания промышленных твердых отходов, имеющих порошкообразную или гранулированную форму, в частности, для регенерации отработанных сорбентов, может найти применение многоподовая печь, разработанная французскими конструкторами М. Ф. Деруэлем и П. Н. Шуллером [25].

Таблица 4

**торых многоподовых печей**

в топке, °С (сверху вниз)

№ 4			№ 5			№ 6		
максимальная	минимальная	средняя	максимальная	минимальная	средняя	максимальная	минимальная	средняя
720	550	635	—	—	—	320	220	270
860	850	855	—	—	—	740	580	660
620	580	600	460	480	470	—	—	—
760	680	720	650	490	570	—	—	—

**Сжигание отходов в барабанных печах**

На рис. 16 показана барабанная печь сжигания, разработанная в Дании [1].

Твердые отходы из бункера 1 мостовым крапом с грейферным захватом подаются в питатель 2 и через него на решетку 7 для подсушки. С решетки 7 ПТО попадает для сгорания на решетку 8. Сгорание органических веществ частично происходит на решетке 7 и окончательно вращающемся барабане 9. Скорость вращения барабана регулируется электроприводом от 4 до 8 об/ч. Шлак через люк 10 выводится из топки.

Печи конструкции фирмы «Волунд» применяются для сжигания твердых отходов во Франции (Париж, Лион) [7], Дании (Худдерсфилд, Догенхам, Кройдон), Италии (Милан), США (Атланта, Майами, Чикаго).

Для сжигания твердых продуктов, образующихся при производстве фотоматериалов, фирмой «Кодак» (США) в 1957 г. применена вращающаяся барабанная печь длиной 21 м, диаметром 3 м и скоростью вращения барабана 120 об/ч [26, 27]. Твердые частицы, улетающие с дымовыми газами, дожигаются в вертикальной башне, после чего продукты дожигания через орошаемый водой скруббер выбрасываются в атмосферу.

Печь подобной конструкции применена фирмой Dow Chemical Company для сжигания осадков промышленных сточных вод. Схема



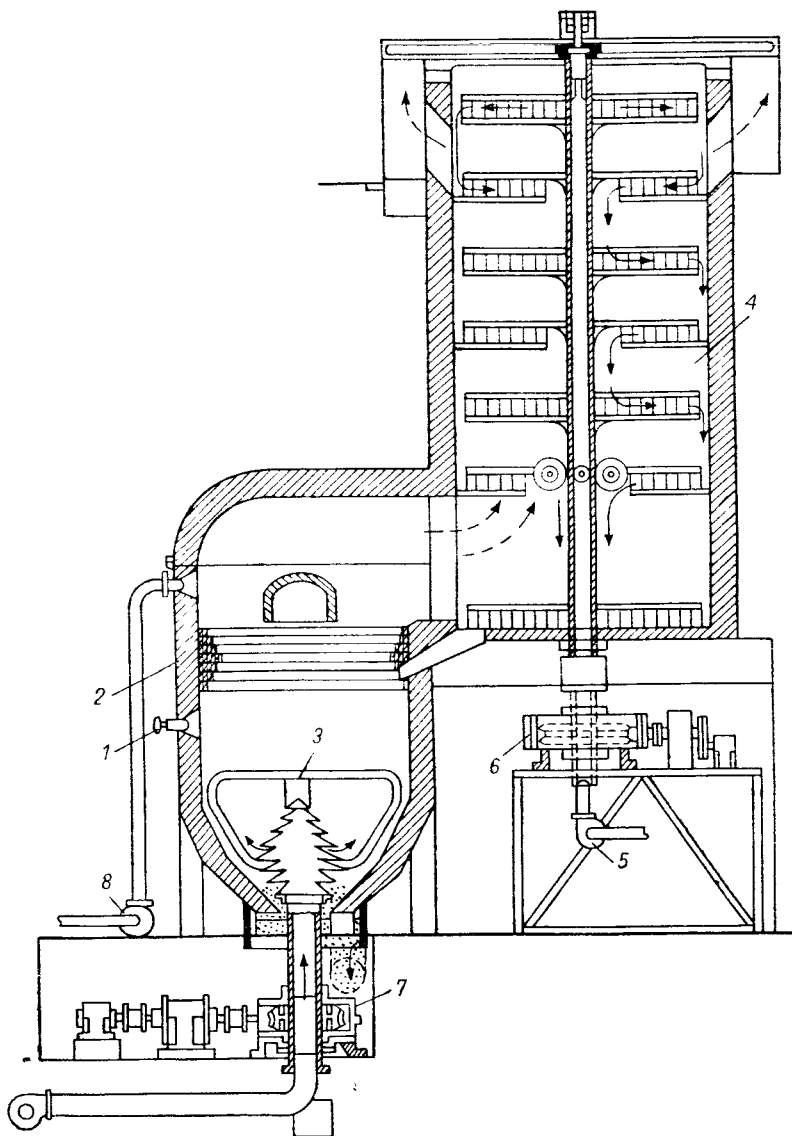


Рис. 15. Принципиальная схема обезвреживания осадков сточных вод, применяемая в Японии:

1 — форсунка; 2 — камера дожигаания золы; 3 — мешалка; 4 — многотопочная печь;  
5 и 8 — вентиляторы; 6 и 7 — приводы мешалок.

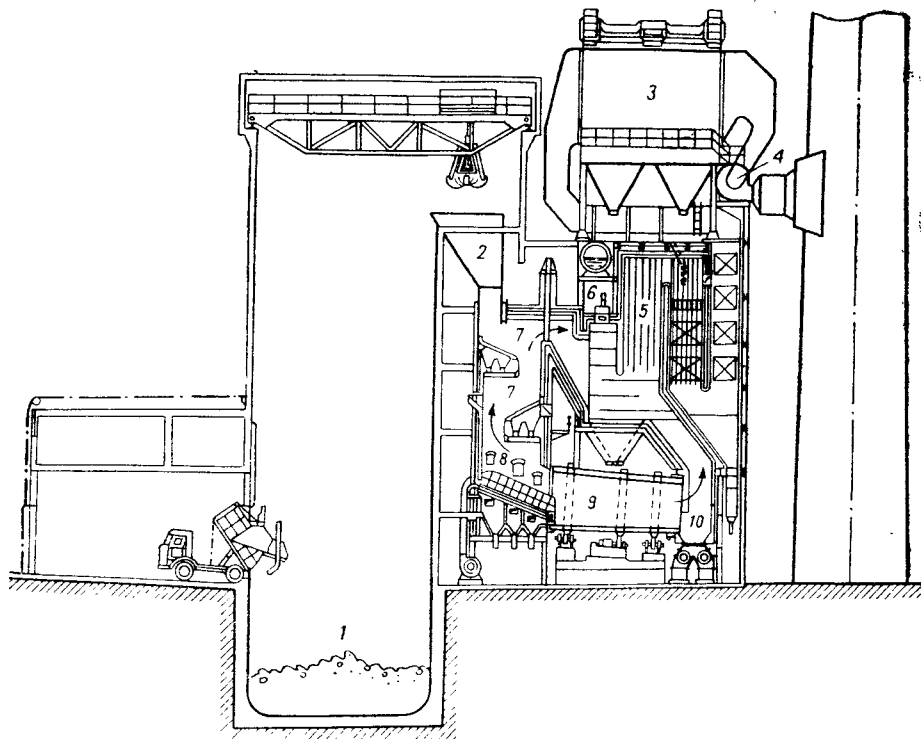


Рис. 16. Печь фирмы «Волунд»:

1 — бункер; 2 — питатель; 3 — электрофильтр; 4 — дымоход; 5 — котел; 6 — горелка;  
7 — решетка для подсушивания; 8 — решетка для зажигания; 9 — вращающийся барабан;  
10 — люк для шлама.

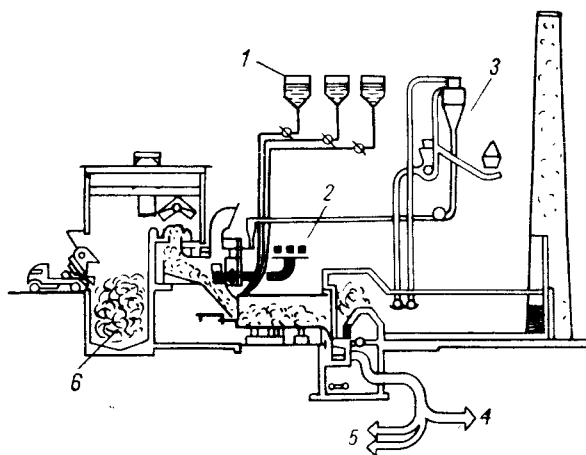


Рис. 17. Схема установки для сжигания производственных твердых отходов в барабанной печи:

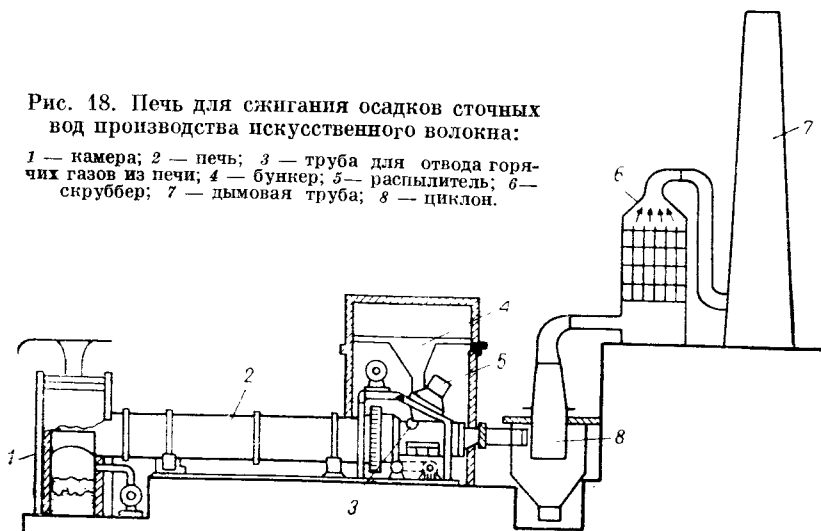
1 — насосы для жидкого топлива; 2 — питающее устройство; 3 — аппаратура для высушивания; 4 — удаление металлических отходов; 5 — летучая зола в отвал; 6 — отходы.

печи показана на рис. 17. Производительность печи, пущенной в 1958 г., составляет 50 т/сутки [28].

На рис. 18 показана схема печи, применяемой для сжигания осадков, которые получают при добавке коагулянтов к сточным водам производства искусственного волокна [29].

Рис. 18. Печь для сжигания осадков сточных вод производства искусственного волокна:

1 — камера; 2 — печь; 3 — труба для отвода горячих газов из печи; 4 — бункер; 5 — распылитель; 6 — скруббер; 7 — дымовая труба; 8 — циклон.



Осадки загружают в бункер 4, из которого они шнеком подаются к распылителю 5 и через него в трубу 3, отводящую горячие газы из печи. Труба имеет наклон в сторону печи. Проходя по трубе, осадок подсушивается и, поступая в печь 2, сгорает вместе с каменным углем. Отходящие из печи газы очищаются в циклоне 8 и орошаются водой в скруббере 6, после чего выбрасываются в атмосферу через трубу 7. Золоудаление осуществляется через камеру 1.

С целью улучшения поступления влажного осадка или суспензии во вращающуюся барабанную печь 1 предложена подача в бункер 4 сжатого воздуха по трубе 5 и вибрация питательной трубы 2.

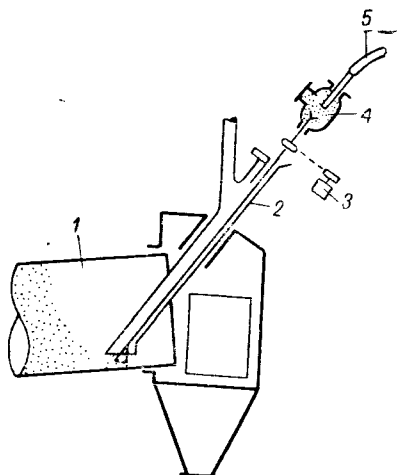


Рис. 19. Схема подачи влажного осадка или суспензии в барабанную печь:

1 — печь для обжига; 2 — питательная труба; 3 — двигатель; 4 — бункер; 5 — труба для подачи сжатого воздуха.

Принципиальная схема узла подачи влажного материала во вращающуюся барабанную печь [30] представлена на рис. 19.

### Обезвреживание отходов в циклонных печах

Сведения об использовании циклонных печей для уничтожения твердых промышленных отходов в литературе отсутствуют. Имеются лишь сообщения о применении циклонных печей для сжигания твердого топлива. На наш взгляд печи подобных конструкций могут

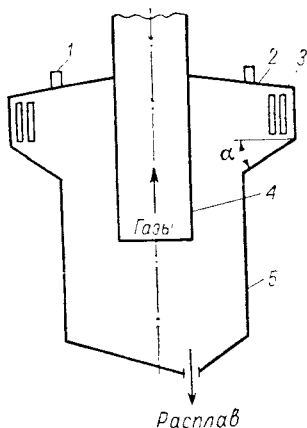


Рис. 20. Принципиальная конструкция циклонной печи с прямой подачей твердого материала:

1 — загрузочный люк; 2 — кольцевое уширение; 3 — патрубки; 4 — труба для вывода продуктов сгорания; 5 — вертикальный цилиндрический корпус.

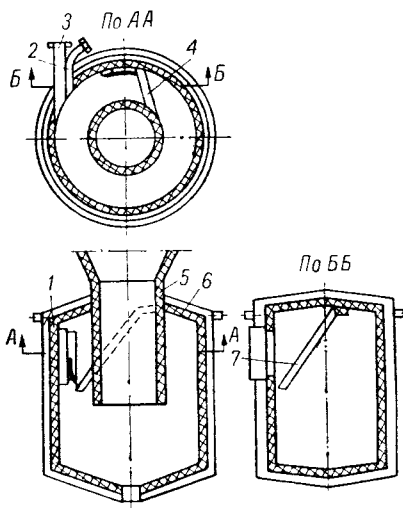


Рис. 21. Принципиальная конструкция циклонной печи с тангенциальным вводом воздуха и твердого материала:

1 — цилиндрический корпус; 2 — горелка; 3 — сопло воздушного дутья; 4 — выступ (внутренний); 5 — отводной патрубок; 6 — крышка; 7 — выступ.

быть применены для обезвреживания твердых промышленных отходов. Конструкция печи с прямой подачей воздуха представлена на рис. 20 [31].

На рис. 20 показана циклонная камера, которая состоит из вертикального цилиндрического корпуса 5 с расположенными в верхней части патрубками 3 для тангенциальной подачи топлива и воздуха и установленной по оси корпуса трубы 4 для верхнего вывода продуктов сгорания. Корпус в зоне расположения патрубков выполнен с кольцевым уширением 2. Твердый продукт подается в камеру через загрузочный люк 1.

Конструкция циклонной печи с тангенциальной подачей воздуха и твердых материалов показана на рис. 21 [32].

На боковой стенке вертикального цилиндрического корпуса 1 размещены горелка 2 и сопло 3. На цилиндрической поверхности корпуса предусмотрен специальный выступ 7, а на внутренней поверхности крышки 6 — дополнительный выступ 4, который начинается у края отводного патрубка 5 и заканчивается на цилиндрической поверхности у спирального выступа 7. Выступ предназначен для направления шлака на цилиндрическую стенку с целью уменьшения его уноса из камеры.

### Сжигание отходов в распылительных печах

В последнее время в США начинает использоваться для обезвреживания осадков сточных вод бумажной промышленности метод АТ (метод атомарного суспензирования или сжигания осадков в печах с распылением) [33—37].

В 1958 г. в Канаде впервые была разработана и построена установка с применением этого метода (г. Беконсфильд). В 1959 г. она была введена в строй. Схема установки [34] показана на рис. 22.

Печь 8 (рис. 22) представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд диаметром 0,6 м и высотой 6 м, изготовленный из нержавеющей стали и нагреваемый снаружи четырьмя электронагревателями общей мощностью 240 квт. Осадок впрыскивается в верхнюю часть печи с помощью пневматической распыливающей форсунки. Производительность печи приблизительно 150 кг осадка в 1 ч.

Рабочие параметры печи:

Температура стенок . . . . .	815° С
Рабочее давление . . . . .	100 мм вод. ст.
Расход воздуха:	
на распыление: . . . . .	66 кг/ч
на сжигание . . . . .	78—80 кг/ч
Время пребывания . . . . .	10 сек
Скорость подачи нефти в форсунку во вторичной печи . . . . .	2,32 кг/ч
Средняя эффективность сгорания . . . . .	92,3—93,4%

Осадок сточных вод из бункера 1 поступает на первичное дробление в дезинтегратор 2. Размельченный осадок насосом 3 подается через вторичный дезинтегратор 4 в форсунку 6. Измерение расхода подачи осадка осуществляется с помощью магнитного расходомера 5. В целях лучшего распределения осадка в печи в форсунку по линии 7 подается сжатый воздух. За счет высокой температуры в верхней части печи (800° С) происходит подсушивание распыленного осадка и сгорание содержащихся в нем органических веществ.

Минеральные продукты в виде золы из печи 8 поступают во вторичную печь 10, где подвергаются дополнительному выжигу. Эффективность окисления органических веществ с применением вторичной печи показана на рис. 23.

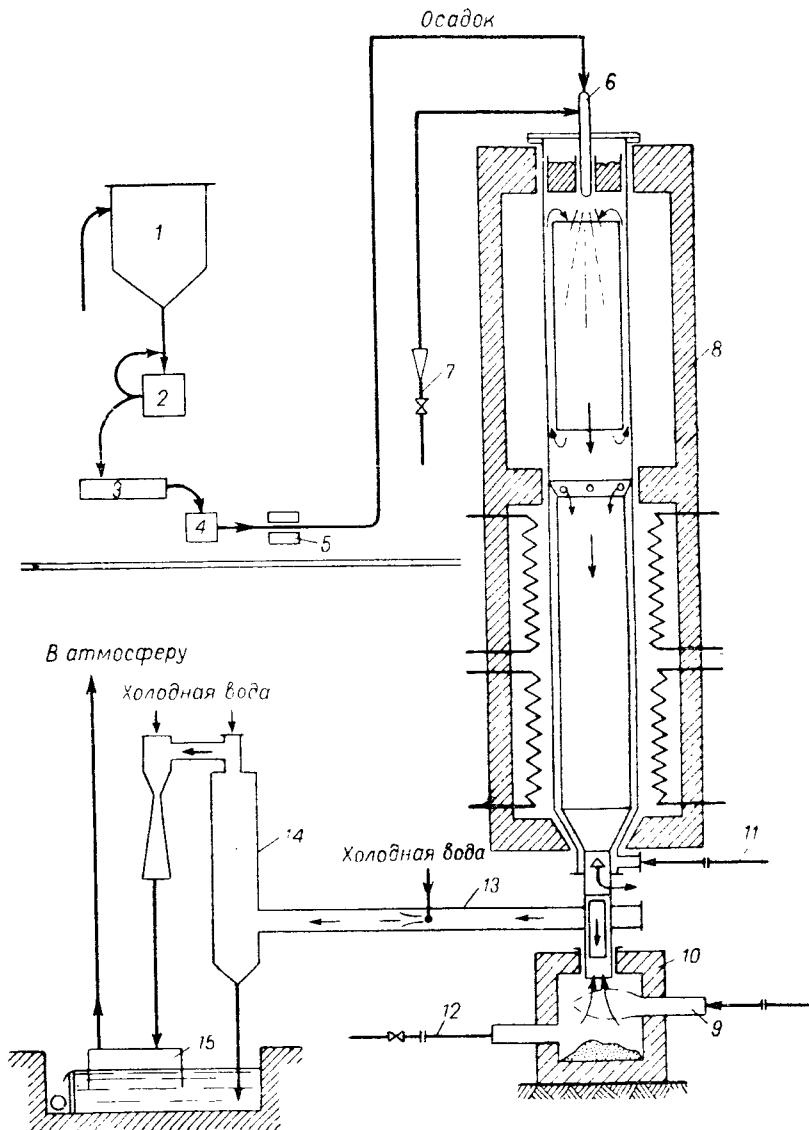


Рис. 22. Схема полузаводской установки, работающей по методу АТ:

1 — бункер; 2 и 4 — дезинтеграторы; 3 — насос; 5 — магнитный расходомер; 6 и 9 — форсунки; 7 — линия сжатого воздуха; 8 — печь АТ; 10 — вторичная печь (дожигательная); 11 и 12 — линии подачи воздуха для горения; 13 — отводной трубопровод; 14 — скруббер; 15 — водяной затвор

Необходимое топливо в печь 10 подается через форсунку 9. Воздух для процесса горения в печи 8 подается по линии 11, для горения в печи 10 подается по линии 12. Влажный пар и продукты сгорания по трубопроводу 13 поступают в скруббер 14 и через водяной затвор 15 выбрасы-

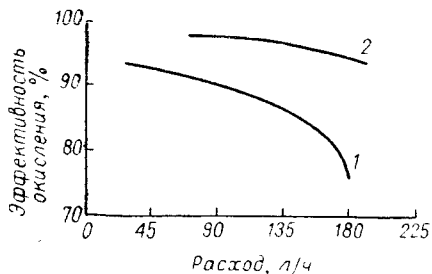


Рис. 23. Эффективность сжигания осадка, содержащего 10—12% минеральных веществ, в распылительной печи диаметром 0,6 м:

1 — без вторичной печи; 2 — со вторичной печью.

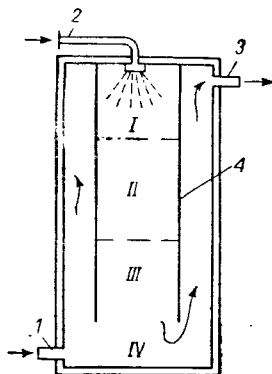


Рис. 24. Принципиальная конструктивная схема распылительной печи:

I — зона распыления и предварительного нагрева; II — зона высушивания и испарения; III — зона перегрева; IV — зона сжигания;

1 — высокоскоростная горелка; 2 — труба для подачи осадка; 3 — отводной трубопровод (к теплообменнику, сепаратору пыли и дымовой трубе); 4 — излучающая стена.

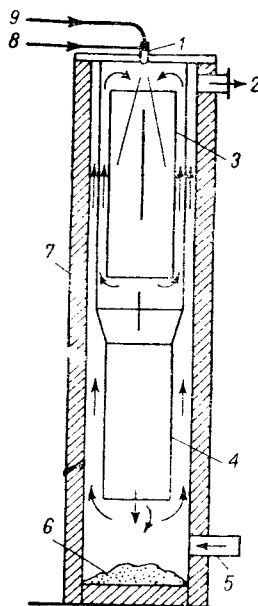


Рис. 25. Принципиальная конструкция распылительной печи АТ:

1 — форсунка; 2 — штуцер для отвода дымовых газов; 3 — дефлектор; 4 — обшивка; 5 — горелка для подачи нефти; 6 — слой золы; 7 — футеровка кирпича; 8 — трубопровод для подачи воздуха; 9 — трубопровод для подачи осадка.

ваются в атмосферу. С целью охлаждения газов в трубопровод 13 впрыскивается вода.

На рис. 24 и 25 показаны некоторые конструкции распылительных печей [34, 35].

## Обезвреживание отходов в печах с псевдооживленным слоем

Процесс сжигания осадков сточных вод в псевдооживленном слое является одним из последних достижений в области термического обезвреживания твердых отходов. Поскольку основой для разработки конструкций печей с псевдооживленным слоем явились конструкции соответствующих аппаратов, применяемых для процессов химической технологии (каталитический крекинг, обжиг руд, сжигание серы, обезвоживание растворов, сушка солей и т. д.), постольку целесообразно показать ряд конструкций аппаратов с псевдооживленным слоем, которые могут быть применены для сжигания твердых отходов.

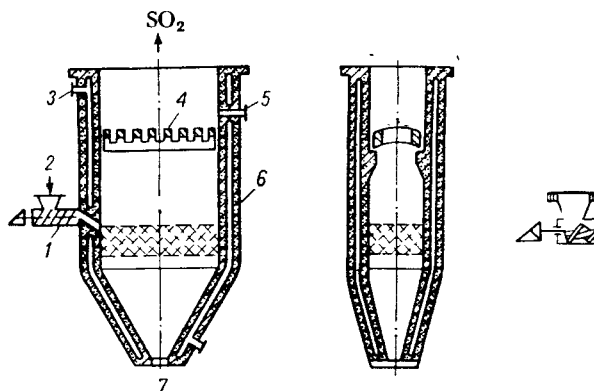


Рис. 26. Печь для сжигания серы в псевдооживленном слое:

1 — питатель; 2 — воронка для подачи серы; 3 — штуцер для подачи воздуха для охлаждения; 4 — отражательная решетка; 5 — штуцер для подачи воздуха для дожигания; 6 — печь; 7 — штуцер для ввода воздуха и спуска шлама.

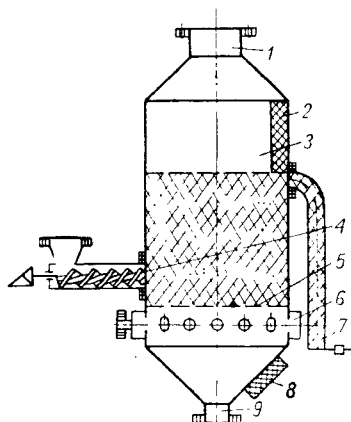


Рис. 27. Одноплочный аппарат, применяемый для сульфатирующего обжига огарка:

1 — штуцер; 2 — огнеупорный материал; 3 — печь; 4 — питатель; 5 — решетка; 6 — коллектор; 7 — труба; 8 — изоляция; 9 — люк для чистки.

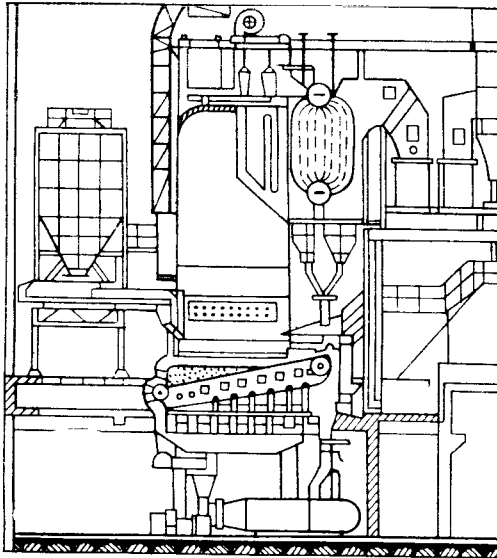
На рис. 26 изображена печь для сжигания серы в псевдооживленном слое [38].

Сера питателем 1 подается в печь 6. За счет горячего воздуха, подаваемого под решетку, сера испаряется и сгорает до сернистого газа. Для более полного сгорания над слоем установлена отражательная решетка 4 и дополнительно подается воздух, используемый для охлаждения корпуса печи 6. Донная часть печи имеет конусообразную форму, которая обеспечивает хорошее распределение подводимого воздуха по сечению печи и хорошее периодическое удаление шлама при уменьшении дутья.

На рис. 27 показан одноплочный аппарат, применяемый для сульфатирующего обжига огарка, содержащего медь [39].

В печь 3 через питатель 4 на решетку 5 подается огарок, содержащий медь. Печной газ подается через коллектор 6 под решетку 5.

*a*



*b*

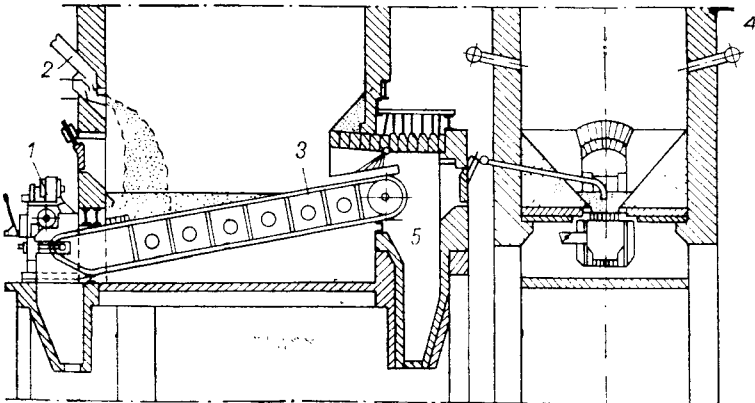


Рис. 28. Схема установки «Иглифлюнд» (Франция).

*a* — Общий вид; *b* — схема топки:

1 — привод; 2 — отверстие для загрузки осадка; 3 — решетка; 4 — форсунки для ввода вторичного воздуха; 5 — бункер для золы.

Под действием газа огарок переходит в псевдоожиженное состояние. Сульфатизированный огарок через трубу 7 выходит из аппарата через определенные промежутки времени. Отработанные газы выводятся из аппарата через штуцер 1. Для чистки аппарат снабжен люком 9. Корпус печи цилиндрический, внутри футерован огнеупорным материалом 2, а снаружи защищен специальной изоляцией 8.

Для сжигания мелкозернистых материалов в настоящее время применяют печи различных конструкций [40, 41].

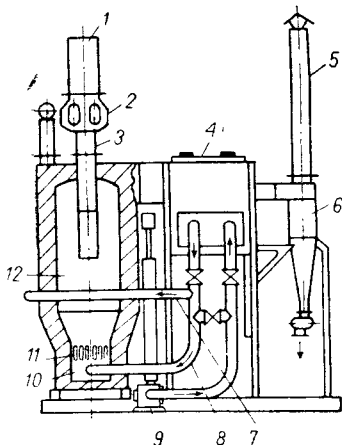


Рис. 29. Схема пилотной установки по сжиганию осадков сточных вод в псевдоожиженном слое: 1 — бункер для осадка; 2 — питатель; 3 — загрузочная труба; 4 — воздухоподогреватель; 5 — дымовая труба; 6 — циклон; 7 и 8 — трубопроводы; 9 — вентилятор; 10 — форсунка; 11 — решетка; 12 — камера сжигания.

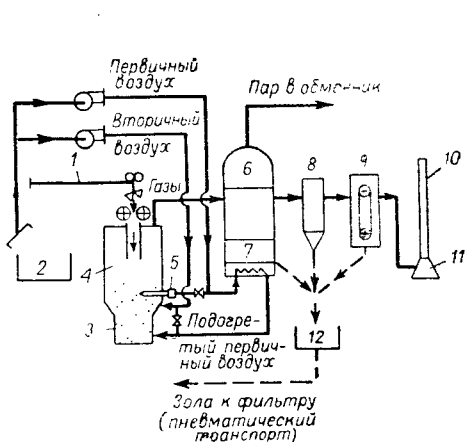


Рис. 30. Схема установки для сжигания осадков сточных вод в псевдоожиженном слое (фирма «Эсслинген»):

1 — мостовой кран с грейферным захватом; 2 — бункер для осадка; 3 — псевдоожиженный слой; 4 — разбавленная фаза (горение); 5 — пусковая горелка; 6 — бойлер; 7 — теплообменник; 8 — циклон; 9 — пылеотделитель; 10 — дымовая труба; 11 — газоочиститель; 12 — бункер для золы.

На рис. 28 приведена схема конструкции печи с псевдоожиженным слоем, используемой французскими фирмами для сжигания угольной пыли.

Первичный воздух под напором 300 мм вод. ст. подается под верхнее полотно решетки, поддерживающее слой. Над поверхностью слоя вдувается вторичный воздух для дожига выносимой из слоя мелочи и образующихся в слое продуктов газификации угля. Шлам, образующийся в слое, выносится движущейся решеткой наружу в виде тонкой непрерывной ленты. В конце рабочей части решетки подается струя воздуха для дожига. Скорость движения решетки регулируется с расчетом, чтобы толщина слоя шлака не превышала 50—60 мм. Удельная тепловая нагрузка решетки 6000 ккал/(м<sup>2</sup>·ч).

Впервые печи с псевдоожиженным слоем использовали для сжигания осадков сточных вод инженеры фирмы «Эсслинген» [42]. Схема установки по обезвреживанию осадков в псевдоожиженном слое показана на рис. 29.

Осадок из бункера 1 питателем 2 по загрузочной трубе 3 поступает в камеру сгорания 12, в нижней части которой расположена решетка 11. Под действием воздуха, подаваемого из воздухонагревателя 4 по трубе 8, инертный материал, в основном зола, применяемая для передачи тепла сжигаемому материалу, переходит в псевдоожигенное состояние. Осадок сточных вод тогда вводится в слой инертного материала. Поступление первичного воздуха в нижнюю часть печи осуществляется через специальное отверстие 10. Для полного сгорания органических продуктов под слой подается по трубе 7 вторичный воздух.

Отходящие газы через воздухонагреватель 4 (регенерация тепла), циклонный газоочиститель 6 по трубе 5 выбрасываются в атмо-

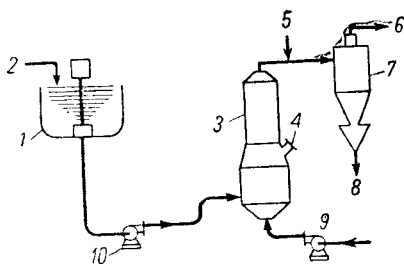


Рис. 31. Схема установки по сжиганию осадков сточных вод в псевдоожигенном слое (сообщение INFJLCO):

1 — смеситель; 2 — осадок; 3 — печь; 4 — горелка; 5 — штуцер для впрыскивания воды; 6 — штуцер для выпуска в атмосферу отбросных газов; 7 — циклон; 8 — бункер для золы; 9 — воздуходувка; 10 — насос-питатель.

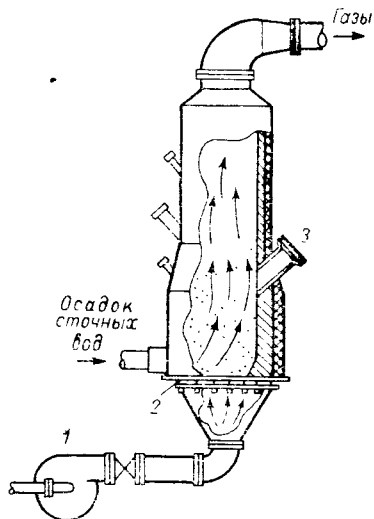


Рис. 32. Схема аппарата для сжигания осадков сточных вод в псевдоожигенном слое (сообщение INFJLCO):

1 — воздуходувка; 2 — газораспределительная решетка; 3 — отверстие для установки форсунки.

сферу. Производительность установки 180—200 кг/ч по сухому осадку сточных вод. Подобные установки были построены в г. Штутгарте и Берлине.

По проекту фирмы «Эсслинген» в Лозанне строится установка по сжиганию осадков сточных вод производительностью 50 т/сутки [33]. Схема такой установки приведена на рис. 30.

В сообщениях «Инфилко» приводятся схема (рис. 31) и конструкция аппарата (рис. 32) для сжигания осадков промышленных сточных вод и осадков канализационных очистных сооружений [43].

Для сжигания осадков сточных вод завода Cliff — Capitola нашли применение печи с псевдоожигенным слоем фирмы «Дорр-Оливер» [44]. Схема представлена на рис. 33.

Производительность установки 220 кг/ч обезвоженного осадка. Температура псевдоожигенного слоя приблизительно 700° С. Время выхода реактора на режим 20 мин.

Для сжигания твердых материалов можно использовать конструкции печей, приводимые в монографии П. Г. Романкова и Н. Б. Рашковской [45], а также в работах иностранных авторов [46, 47].

Анализируя работу печей указанных конструкций можно предположить, что наиболее удобными и выгодными для сжигания промышленных твердых отходов и осадков сточных вод являются печи с псевдооживленным слоем. Печи этой конструкции имеют ряд существенных преимуществ перед конструкциями других печей:

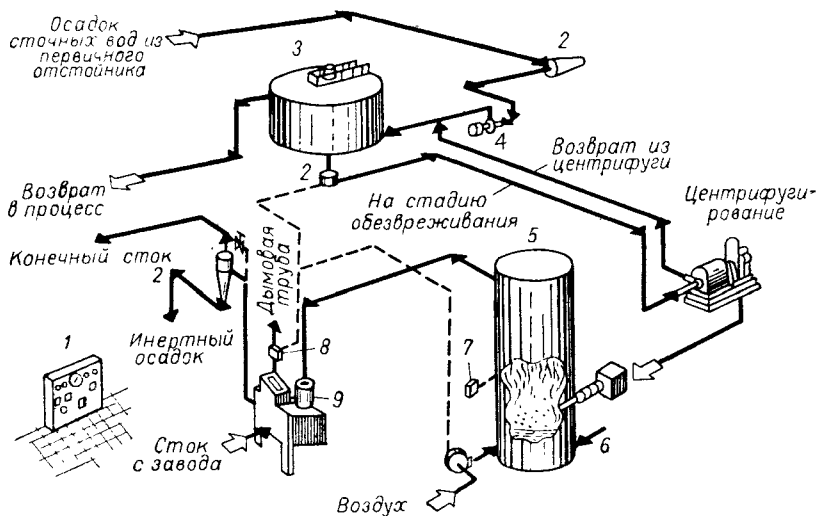


Рис. 33. Сжигание осадков сточных вод в печах с псевдооживленным слоем: 1 — контрольная панель; 2 — насос; 3 — уплотнитель; 4 — дробилка; 5 — реактор; 6 — горелка (для подачи топлива); 7 — оптический термометр; 8 — анализатор; 9 — скруббер.

1) процесс в печах с псевдооживленным слоем не зависит от способов обезвоживания осадка, т. е. сжигаются отходы любой влажности, любого содержания минеральных веществ;

2) процессы подсушивания и горения отходов совмещены;

3) процесс сгорания отходов происходит очень быстро в небольшом объеме печи; возможна очень компактная конструкция печи с небольшим временем пребывания отходов в печи;

4) в зоне горения нет механических и вращающихся устройств;

5) процесс не требует больших затрат ручного труда и может быть полностью автоматизирован;

6) тепло отходящих газов может быть использовано для получения энергетического пара (если это потребуется);

7) контроль за установкой прост и может осуществляться одним человеком;

8) аппарат не требует остановок для очистки; вспомогательная горелка (нефтяная или газовая) дает возможность пускать установку за короткое время (в среднем 20 мин).

## Глава 2

### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ЖИДКИХ ОТХОДОВ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР СПОСОБА ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ

Сточными водами (СВ) называются воды, использованные промышленными или коммунальными предприятиями и населением, подлежащие очистке и нейтрализации от различных примесей. В зависимости от условий образования сточные воды разделяются на:

- 1) бытовые, или хозяйственно-фекальные (БСВ);
- 2) производственные (ПСВ):
  - а) условно-чистые (ПСВ-у);
  - б) грязные (ПСВ-г);
- 3) атмосферные (АСВ).

Бытовые сточные воды [48] состоят примерно на 59% из органических примесей и 42% минеральных веществ, из них 20% представляют собой нерастворимые взвешенные вещества. Химический состав БСВ (в г на одного человека в сутки) следующий:

Азот аммонийный . . . . .	7—8
Хлориды . . . . .	8—9
Фосфаты . . . . .	1,5—1,8
Калий . . . . .	3
Органические вещества . . . . .	5—7

Для бытовых сточных вод имеются освоённые, всюду применяемые и многолетним опытом проверенные процессы очистки. Разработка и усовершенствованию процессов очистки БСВ благоприятствовало то, что основная часть присутствующих им загрязнений имеет один и тот же состав.

*Условно-чистыми* водами (ПСВ-у), как правило, являются конденсаты, воды от охлаждения технологических аппаратов и машинных отделений. Эти воды охлаждаются в заводских прудах или градирнях, очищаются от механических загрязнений и масел, а затем возвращаются на производство при ограниченной добавке свежей воды.

*Атмосферные* сточные воды (АСВ), образующиеся в результате выпадения атмосферных осадков, если они не просачиваются в почву, должны смешиваться с бытовыми сточными водами. Если же они

в большом количестве загрязнены вредными веществами, попадающими на почву химическими продуктами, то АСВ должны подвергаться обезвреживанию так же, как и ПСВ-г.

*Промышленные* сточные воды, загрязненные различными химическими соединениями и вредными продуктами (ПСВ-г), как по количеству, так и по составу различны не только для разных предприятий, но даже для цехов и отдельных установок на одном и том же производстве. Состав ПСВ-г чрезвычайно разнообразен и целиком зависит от рода производства и совершенства технологического процесса.

По этой причине дать какую-либо типовую характеристику ПСВ-г не представляется возможным. Однако для систематизации материала, анализ которого позволил бы правильно выбрать способ термического обезвреживания, его режим и конструктивное оформление, предлагаем следующую классификацию промышленных сточных вод (ПСВ-г):

По составу:

- А. ПСВ-г, содержащие только органические вещества;
- Б. ПСВ-г, содержащие только неорганические вещества;
- В. ПСВ-г, содержащие как органические, так и неорганические вещества.

По физическим свойствам продуктов, находящихся в ПСВ-г:

Г. Органические продукты:

- 1) продукты, обладающие высоким давлением паров и температурой кипения до  $110-120^{\circ}\text{C}$ ;
- 2) продукты с температурой кипения от  $110-120$  до  $200-250^{\circ}\text{C}$ ;
- 3) продукты с температурой кипения более  $250^{\circ}\text{C}$ .

Д. Неорганические продукты:

- 1) вещества, характеризующиеся низкой температурой плавления или разложения, которые ниже температуры сгорания органических продуктов;
- 2) вещества с высокой температурой плавления и разложения, абсолютные значения которых выше температуры сгорания органических продуктов.

По калорийности:

- 1) промышленные стоки, способные самостоятельно гореть как жидкое топливо; к ним следует отнести стоки, как установлено опытами [42], с калорийностью  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  не менее  $8,4 \text{ Мдж/кг}$  ( $2000 \text{ ккал/кг}$ );
- 2) промышленные стоки с высоким содержанием воды и калорийностью  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  ниже  $8,4 \text{ Мдж/кг}$ , для сжигания которых необходимо добавлять высококалорийное топливо.

Систематическое накопление экспериментального материала и классификация его по предлагаемой схеме позволят заранее предсказать и выбрать наилучший способ обезвреживания и конструктивное оформление процесса.

Таблица 5

Выбор способа обезвреживания и конструктивного оформления процесса  
в зависимости от состава и свойств продуктов ПСВ-г

(+ — наличие обезвреживаемых продуктов в отходах; — — отсутствие этих  
продуктов в отходах)

Состав	Органические продукты (группа Г)			Неорганические продукты (группа Д)		Применяемые в промышленности методы термического обезвреживания
	$t_{кип}$ до 110—120°C	$t_{кип}$ до 200—250°C	$t_{кип}$ выше 250°C	$t_{пл} < t_{разл}$	$t_{пл} < t_{разл}$	
	1Г	2Г	3Г	1Д	2Д	
ПСВ-г, содержащие органические вещества (группа А)	+	—	—	—	—	Способ Циммермана; циклонные печи; каталитический способ с предварительной отгонкой; камерные печи; печи с псевдоожиженным слоем
	+	+	+	—	—	
ПСВ-г, содержащие органические вещества (группа А)	—	+	—	—	—	Способ Циммермана; циклонные печи; камерные печи с дожиганием; печи с псевдоожиженным слоем
	—	—	+	—	—	
ПСВ-г, содержащие неорганические вещества (группа Б)	—	—	—	+	—	Распылительные печи; печи с псевдоожиженным слоем; камерные и шахтные печи
	—	—	—	—	+	
	—	—	—	+	+	
ПСВ-г, содержащие неорганические и органические вещества (группа В)	+	—	—	+	—	Способ Циммермана; циклонные печи с системой доочистки; камерные печи с системой дожигания и доочистки; печи с псевдоожиженным слоем и системой доочистки
	+	—	—	—	+	
	+	—	—	+	+	
	—	+	—	+	—	
	—	+	—	—	+	
	+	—	+	+	—	
	+	—	+	—	+	
	+	+	—	+	—	
	+	+	—	—	+	
	+	+	—	—	+	
	—	+	+	+	—	
	—	+	+	—	+	
	—	+	+	—	+	
	—	+	+	+	+	
—	+	+	+	+		
—	—	+	+	—	То же, что и для В-1Г-1Д, но без дожигателей для камерной печи	
—	—	+	—	+		
—	—	+	+	+		

Отсутствие в литературе данных не позволяет пока составить полные расчетные номограммы и таблицы, основываясь на экспериментальном опыте обезвреживания ПСВ-г на промышленных установках.

На основе опубликованных материалов составлена таблица, облегчающая выбор способа обезвреживания и конструктивного оформления процесса в зависимости от состава стока и свойств компонентов, входящих в ПСВ-г (табл. 5).

Окончательный выбор способа термического обезвреживания и конструктивного оформления процесса производится с учетом следующих факторов:

- 1) количества ПСВ-г;
- 2) калорийности ПСВ-г;
- 3) наличия у предприятия необходимых для процесса обезвреживания энергоресурсов (пар, топливо, сжатый воздух, электроэнергия) и катализаторов;
- 4) требований, предъявляемых к очищенным ПСВ-г, и дальнейшего использования их;
- 5) экономичности процесса обезвреживания.

В этой главе рассматриваются и сравниваются конструкции печей и схемы установок, получивших применение в промышленной практике для обезвреживания ПСВ-г.

### Обезвреживание ПСВ-г в камерных и шахтных печах

В 1940—1943 гг. фирмой Лурги в Ленциге была впервые построена совместно с фирмой Штейнмюллер установка для упаривания и сжигания сульфитных щелоков по системе шведского инженера Рамена. После войны установка была переделана в четырехступенчатую вакуумвыпарную установку со сжиганием 50—60%-ного концентрата в печи [49], схема конструкции которой приведена на рис. 34.

Распыляемый при помощи сопел щелок подсушивается и сгорает в противотоке дымовых газов. Отходящие газы обогревают паровой котел. Так как щелок плохо воспламеняется, в точку одновременно с подачей щелоков стали вводить угольную пыль. В СССР эта схема сжигания сточных вод была освоена позднее [50].

На рис. 35 показана схема установки, приспособленной фирмой Лурги для сжигания щелока с угольной пылью [49].

В топочной камере котла 8 устроен экран 5, включенный в циркуляционную систему котла. В пространство 6, образованное стенками топочной камеры и экраном, через распылитель 10 при помощи перегретого пара вырывается щелок. Навстречу струе щелока подается через сопла 3 первичный воздух, необходимый для процесса горения. Зажигание щелока осуществляется при помощи горелки 2. Температура топочного пространства в точке 4 составляет 1600—1700° С, в точке 7 — 1100—1200° С. Вторичный воздух подается в печь через дроссельный клапан 1. Подача угольной пыли осуществляется через горелку 9, расположенную между форсунками для

щелока. Расход электроэнергии при сжигании 1 т щелока составляет 1,2 квт·ч, расход пара — 50—100 кг/ч.

Для обезвреживания ПСВ-г целлюлозно-бумажных комбинатов применяют различные схемы установок и печей с целью сжигания органических веществ и выделением неорганических продуктов (в виде различных солей натрия) [51—54].

Для обезвреживания многозольных и малокалорийных стоков используется установка [55, 56], схема которой приведена на рис. 36.

ПСВ-г поступают в приемные емкости 13, откуда центробежным

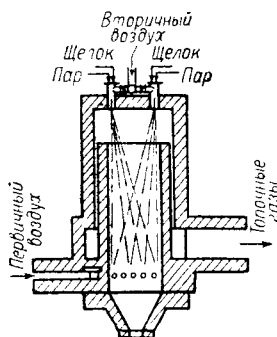


Рис. 34. Схема топki Лурги для сжигания упаренного сульфитного щелока (типа В-2, ЗГ-1Д).

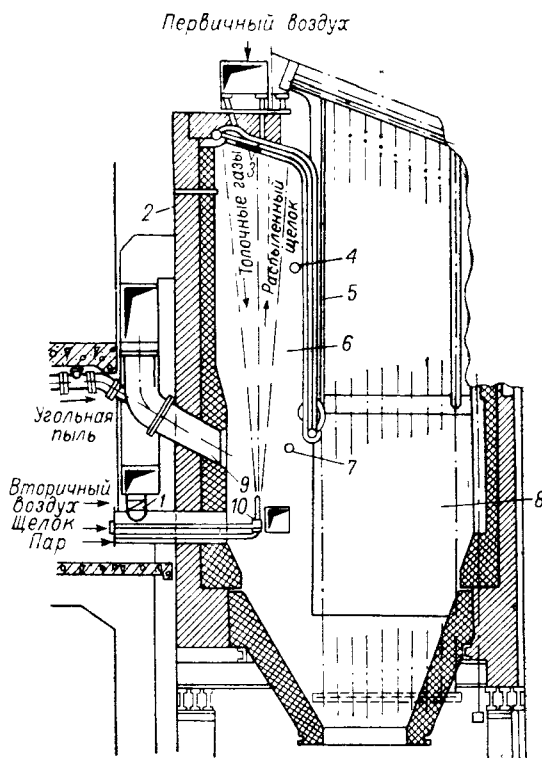


Рис. 35. Топка Лурги для сжигания упаренного сульфитного щелока с угольной пылью (типа В-2, ЗГ-1Д):

1 — дроссельный клапан для подачи вторичного воздуха; 2 — горелка; 3 — сопла для подачи первичного воздуха; 4 и 7 — места замера температуры; 5 — трубки экрана; 6 — часть топочной камеры у экрана; 8 — нижняя часть топочной камеры котла; 9 — горелка для пыли; 10 — распылитель щелока.

насосом 14 подаются через механические центробежные форсунки 1 в скруббер 4. Распыленные стоки упариваются в скруббере до концентрации 50—60% (считая на сухое вещество) за счет нагревания их дымовыми газами. Температура отходящих газов 85—90° С. Сгущенные стоки самотеком поступают либо в приемные емкости, либо в расходные емкости 12, из которых насосом 11 через форсунку 6 подаются в топку 5 на сжигание.

Подача топлива в печь осуществляется через форсунку 7. Воздух, необходимый для полного сгорания органических продуктов, подается вентилятором 8. Расплав солей через летку поступает в вагонетки 9. Температура в печи 850—900° С.

Данная схема непригодна для обезвреживания сточных вод типа В-1Г-1Д, поскольку легколетучие органические вещества вместе

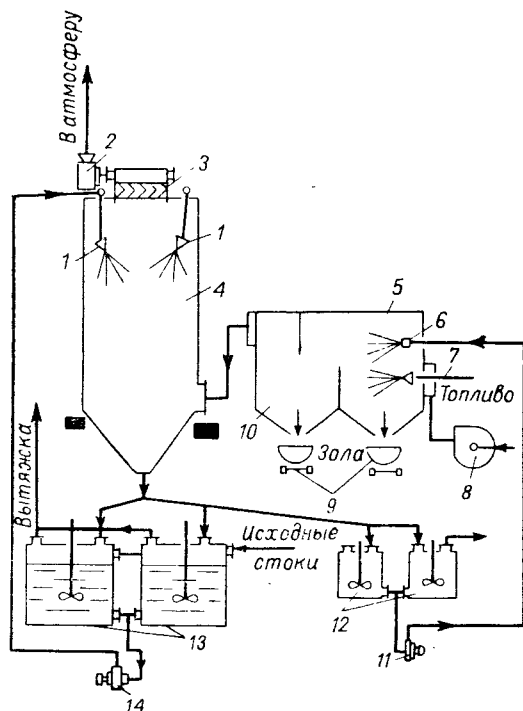


Рис. 36. Схема сжигания многозольных малокалорийных отходов (типа В-2, 3Г-1Д).

1 — центробежная форсунка; 2 — вентилятор; 3 — каплеуловитель; 4 — скруббер; 5 — топка; 6 — форсунка для подачи стока; 7 — форсунка для подачи топлива; 8 — вентилятор; 9 — вагонетки; 10 — камера осаждения зоны; 11 — насос; 12 — расходные емкости; 13 — приемные емкости; 14 — насос скруббера.

с парами воды могут уноситься дымовыми газами и загрязнять атмосферу. Полное обезвреживание легколетучих органических веществ в сточных водах осуществляется по схемам [56], приведенным на рис. 37 и 38.

Для обезвреживания ПСВ-г (типа А-1, 2, 3 или В-1, 2, 3 Г-2Д) нашла применение в бумажной промышленности Швеции и Польши схема сжигания [56], приведенная на рис. 39.

Для сточных вод типа В-3Г-2Д можно рекомендовать схему, которая была разработана ВТИ имени Дзержинского, НИОПИК и ГИПРООРХИМом [50, 57] применительно к стокам анилино-красочной промышленности (рис. 40).

Для обезвреживания ПСВ-г, содержащих фенол и метиловый спирт, ВНИИТ была разработана, сооружена и испытана камерная печь производительностью 2 т/сутки. На рис. 41 приведен общий

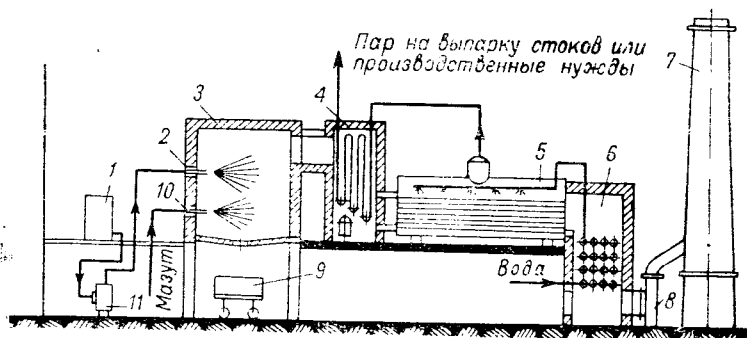


Рис. 37. Схема сжигания ПСВ-г группы А с использованием котла-утилизатора:

- 1 — емкость для промышленных сточных вод; 2 — форсунка; 3 — топка;  
4 — котел-утилизатор; 5 и 6 — холодильники; 7 — дымовая труба; 8 — дымосос; 9 — вагонетка; 10 — форсунка для топлива; 11 — насос.

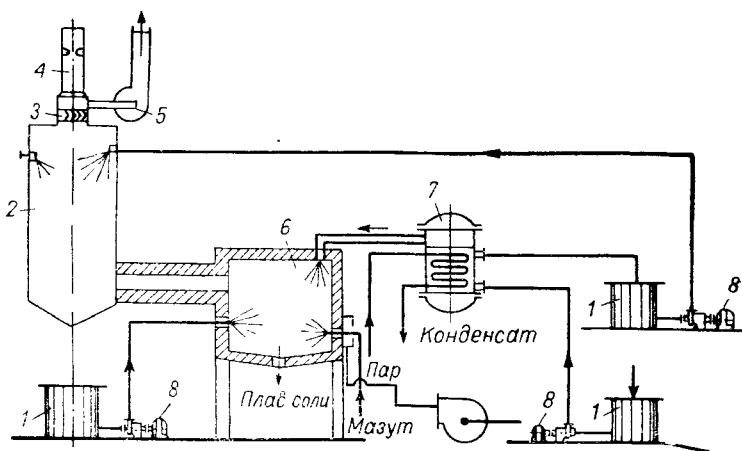


Рис. 38. Схема сжигания сточных вод типа В-1; 2, 3 Г-1Д:

- 1 — емкость; 2 — скруббер; 3 — каплеуловитель; 4 — прямой газоход;  
5 — вентилятор; 6 — топка; 7 — выпарной аппарат; 8 — насос.

вид вертикальной однокамерной цилиндрической печи для сжигания сточных вод [58].

Состав обезвреживаемых сточных вод (в г/л):

Фенолы . . . . .	45
Формальдегид . . . . .	30
Метиловый спирт . . . . .	70

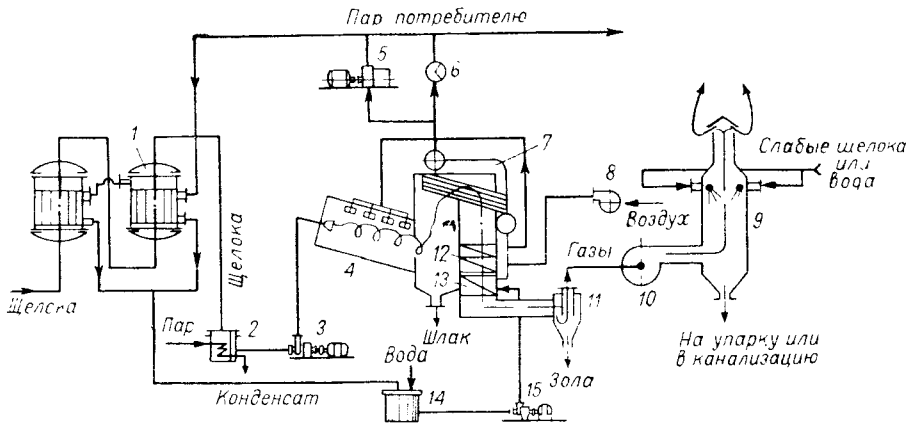


Рис. 39. Схема сжигания высококалорийных малозольных стоков:

1 — выпарная установка; 2 — емкость для упаренных сточных вод; 3 — насос; 4 — циклонная топка; 5 — турбогенератор; 6 — редукционная увлажнительная установка; 7 — паровой котел; 8 — вентилятор; 9 — мокрый скруббер; 10 — дымосос; 11 — центробежный циклон; 12 — воздухоподогреватель; 13 — питательный бак; 14 — питательный насос.

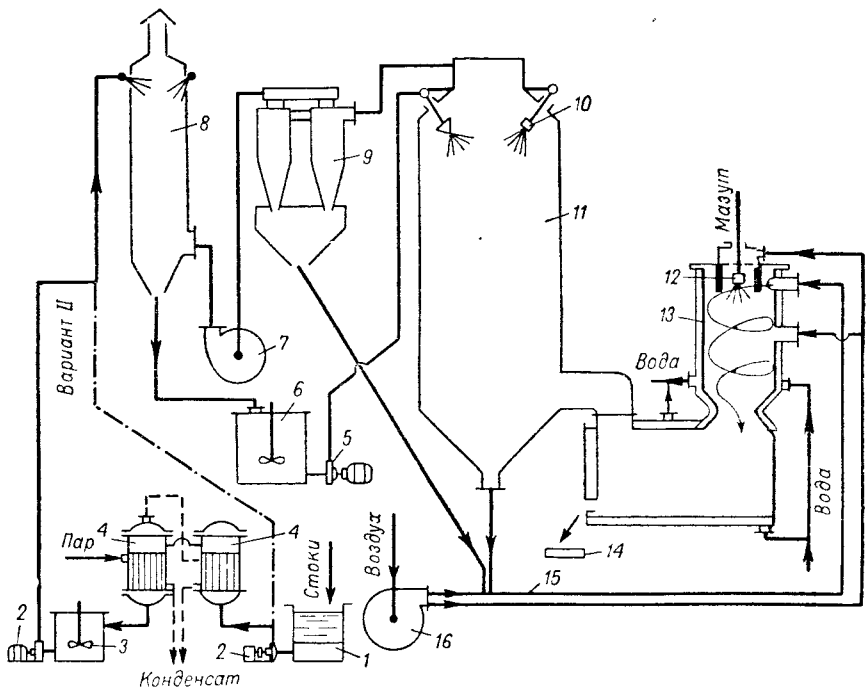


Рис. 40. Схема обезвреживания промышленных стоков с малым содержанием органических нелетучих веществ и получением товарной соли:

1 — емкость для нейтрализации; 2 и 5 — насос; 3 — емкость; 4 — выпарная установка; 6 — емкость с мешалкой; 7 — дымосос; 8 — мокрый скруббер; 9 — циклон; 10 — форсунка; 11 — распылительная сушилка; 12 — форсунка для мазута; 13 — циклонная топка; 14 — охладитель плава; 15 — пневмотранспорт; 16 — турбоэксгаустер.

Температура в печи  $1100^{\circ}\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,06-1,12$ . Время пребывания газов в печи  $0,8-1,0$  сек.

На основе экспериментальных результатов ВНИИТ была спроектирована подобная печь производительностью  $10 \text{ м}^3/\text{сутки}$ . Внутренний диаметр печи  $1,4 \text{ м}$ , высота  $11 \text{ м}$ ; печь оборудована четырьмя форсунками низкого давления типа «Стальпроект» с изменениями ВНИИТа номинальной производительностью  $125 \text{ л/ч}$ . Диаметр водяного сопла форсунок  $6 \text{ мм}$ , диаметр шести воздушных сопел  $7,5 \text{ мм}$ . Давление воздуха на форсунку  $400 \text{ мм вод. ст.}$

Форсунки расположены в 2 пояса на отметках  $2,3$  и  $5,8 \text{ м}$ . Для создания температуры, необходимой для сжигания органических веществ, печь снабжена четырьмя газовыми двухпроводными горелками типа ГНП-15, расположенными на отметках  $1,5$  и  $5 \text{ м}$  по 2 горелки в поясе. Сжигание органических загрязнений ведется при  $1000-1050^{\circ}\text{C}$ .

Нередко для сжигания сточных вод используют камерные горизонтальные цилиндрические печи [1]. Общий вид такой печи представлен на рис. 42.

Для обезвреживания сточных вод, содержащих цианиды, на заводе фирмы «Мартин и Ко» (г. Орландо, Флорида) была сооружена и испытана установка [59], схема которой приведена на рис. 43.

Для обезвреживания сточных вод и твердых отходов Могилевского комбината синтетического волокна английской фирмой «Полиспенерс» рекомендована камерная печь прямоугольной формы с камерой сгорания и дожигания [60]. Температура в камере  $900^{\circ}\text{C}$ ; используемое топливо — мазут.

Подобная конструкция печи производительностью  $1-1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$  разработана ГИПРОГАЗом [60]. Распыливание ПСВ-г осуществляется механическими форсунками «Ильмарине» в верхнюю часть топочного пространства. Температура в рабочей части печи  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Вертикальные шахтные печи, разработанные ГИАПом, работают на ряде химических предприятий [60].

Печь, работающая на Лисичанском химическом комбинате, имеет диаметр  $4 \text{ м}$ , высоту  $21 \text{ м}$ ; производительность печи по ПСВ-г  $30-40 \text{ м}^3/\text{сутки}$ ; температура в печи  $800-900^{\circ}\text{C}$ .

На полноту сгорания органических веществ, находящихся в ПСВ-г, сильное влияние оказывают условия диспергирования и распределения жидкости форсунками в печи.

Типовая установка форсунок для сжигания жидких отходов в камерных и шахтных печах фирмы «БАСФ» [61] показана на рис. 44.

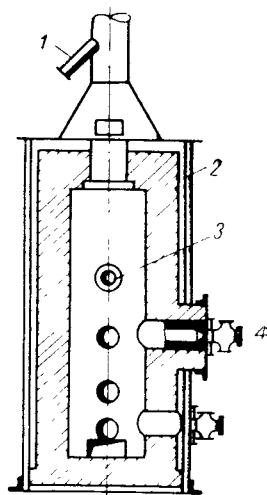


Рис. 41. Общий вид камерной цилиндрической вертикальной печи для сжигания сточных вод (конструкция ВНИИТ):

1 — штуцер для отбора дымовых газов; 2 — печь; 3 — форсунка для раствора; 4 — форсунка для топлива.

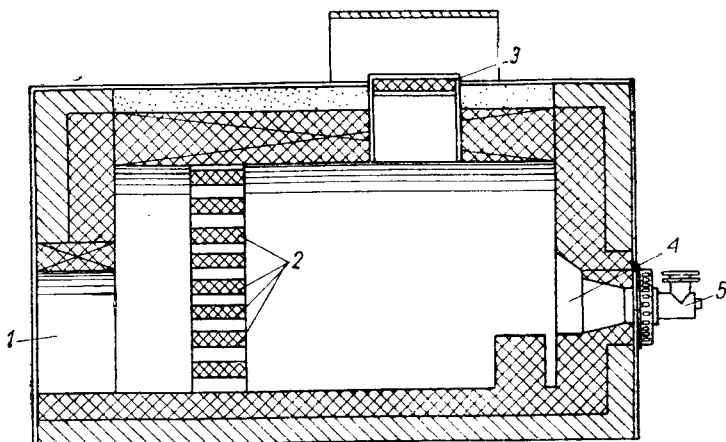


Рис. 42. Общий вид камерной цилиндрической горизонтальной печи для сжигания сточных вод:

1 — боров; 2 — дожигательная огнеупорная насадка; 3 — взрывной клапан; 4 — амбразура; 5 — форсунка.

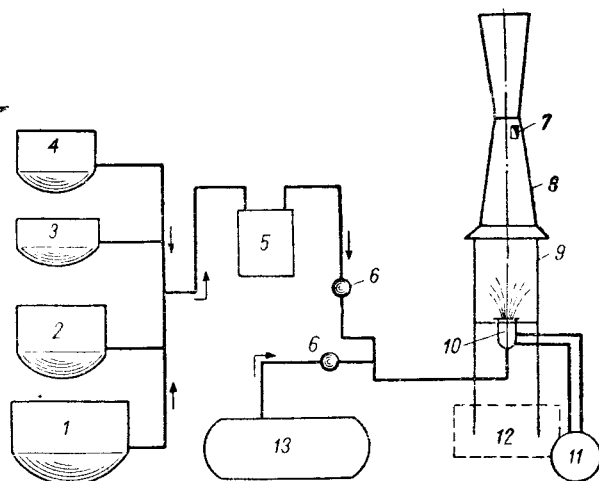


Рис. 43. Схема обезвреживания сточных вод, содержащих цианиды:

1 — бак для нефтепродуктов, растворителей фенола; 2 — бак для комплексных цианидов; 3 — бак для шлама; 4 — бак для хлорида железа; 5 — отстойник; 6 — насос; 7 — прибор для контроля температуры; 8 — секция Вентури; 9 — рабочая часть печи; 10 — горелка; 11 — вентилятор; 12 — контрольная панель; 13 — резервуар для хранения топлива.

Камерные и шахтные печи рекомендованы для сжигания сточных вод фармацевтических заводов [62, 63], для обезвреживания ПСВ-г лакокрасочных производств [64], для очистки сточных вод предприятий черной металлургии [65].

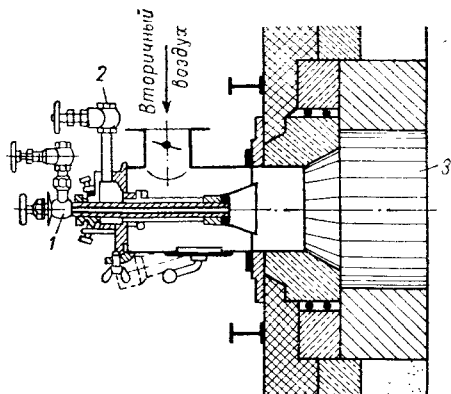


Рис. 44. Общий вид установки форсунки для распыливания жидких отходов в печах фирмы «Басф»:

1 — вентиль на линии подачи раствора; 2 — вентиль на линии первичного воздуха; 3 — стенка печи.

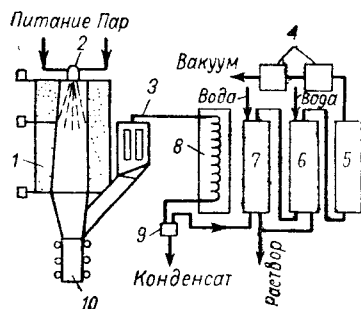


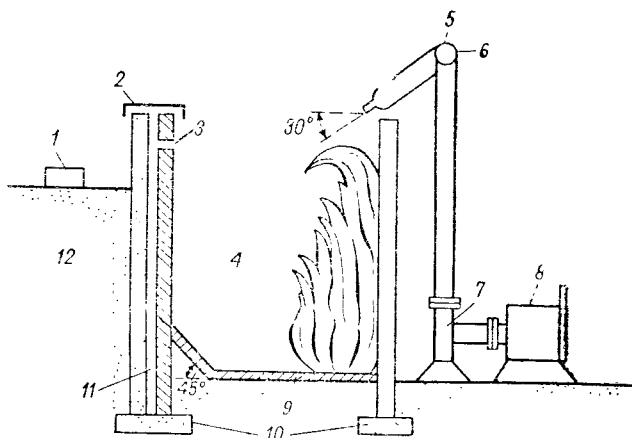
Рис. 45. Схема обезвреживания жидких радиоактивных отходов, содержащих минеральные соли:

1 — печь; 2 — форсунка; 3 и 4 — фильтры; 5 — адсорбер; 6 — скруббер II; 7 — скруббер I; 8 — конденсатор; 9 — ловушка; 10 — тигель.

Для обезвреживания сточных вод, содержащих уранил-нитраты, с получением нитратов широкое распространение в США

Рис. 46. Схема печи для сжигания ПСВ-г, содержащих взрывоопасные вещества:

1 — загрузочный люк; 2 — дождевой кожух; 3 — отверстия для охлаждающего воздуха; 4 и 11 — воздушное пространство; 5 — форсунка; 6 — коллектор; 7 — вентилятор; 8 — мотор; 9 — черепичная основа; 10 — опоры; 12 — аппарат для поддержания стены.



получили установки [35, 66], принципиальная схема одной из которых приведена на рис. 45.

Обезвреживание жидких отходов, содержащих взрывоопасные вещества, в зависимости от химической природы взрывоопасного вещества можно либо сжигать в слое восстановителя, например,

угля [67], либо непосредственно в заглубленных печах [68, 69]. Для сжигания отходов производства нитроцеллюлозы на заводе в городе Карнейс применяется печь [68], принципиальная схема которой представлена на рис. 46.

Обезвреживаемые отходы подаются в печь. За счет давления паров продуктов над слоем жидкости в зоне расположения форсунок 5 создаются условия для горения. Форсунки дают цилиндрическое вращающееся пламя с температурой  $800-1000^{\circ}\text{C}$ . За счет турбулизации потока и высокой температуры сжигание органических веществ происходит полностью. Производительность печи составляет  $4\text{ м}^3/\text{ч}$ .

Сжигание жидких отходов в печи открытого типа, установленной на поверхности земли, нашло применение на заводе в г. Елмайра (Онтарио, Канада). Производительность печи  $0,55\text{ м}^3/\text{ч}$  [70].

### Сжигание ПСВ-г в циклонных топках

Впервые циклонная печь была применена для термического обезвреживания сульфатных щелоков на заводе в Лоддби фирмы Холменнс Брук Фабрике АБ в 1949 г. [71, 72]. Схема циклонной топki Лоддби [54] показана на рис. 47.

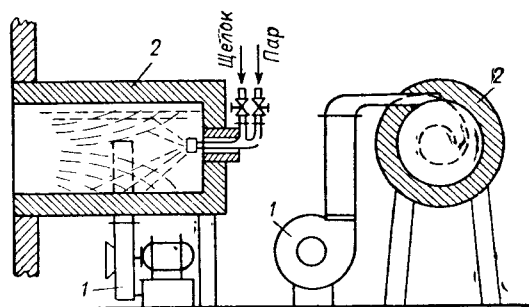


Рис. 47. Схема циклонной топki Лоддби:  
1 — вентилятор; 2 — циклонная печь.

Выходящий из каналов воздух приобретает вращательное движение и перемещается вдоль оси цилиндра по спирали. Открытым торцом цилиндр связан с топкой парового котла, на другом его торце помещается форсунка, в которую под давлением около  $7\text{ ат}$  поступает в печь распыляемый паром щелок. По выходе из форсунки распыленный щелок смешивается с потоком воздуха. Капли щелока высыхают и воспламеняются. Несгоревшие частицы за счет центробежной силы отбрасываются к стенкам печи, где наибольшая концентрация кислорода, и там догорают.

Вводимый в печь воздух предварительно не подогревается вследствие чего температура у стенок ниже температуры пламени. Зола, отбрасываемая к стенке, выгружается из печи раз в смену. Печь

Лоддби футерована глиноземистым кирпичом (60%  $Al_2O_3$  и 40%  $SiO_2$ ). Объем печи производительностью 6,3  $m^3$  упаренного щелока составляет 4,15  $m^3$  (длина 3,75 м, диаметр 1,2 м) [54].

В последующие годы конструкция печей фирмы Лоддби была усовершенствована путем введения пережимного устройства на выходе газа из печи и подачи обезвреживаемых стоков через боковые стенки цилиндра печи.

Принципиальная схема горизонтальной циклонной печи с пережимом и с введением обезвреживаемых сточных вод через торец [50] показана на рис. 48.

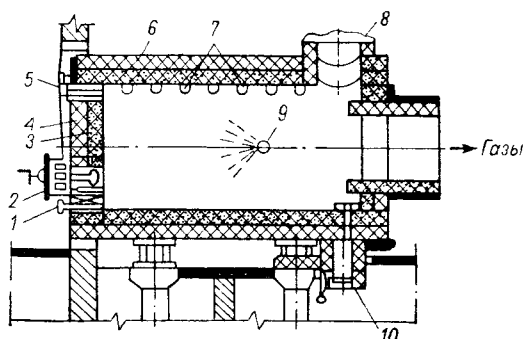


Рис. 48. Схема горизонтальной циклонной печи:

1 — люк для приборов; 2 — горелка; 3 — кладка из хромомагнезитового кирпича; 4 — кладка из шамотного кирпича; 5 — смотровое стекло; 6 — металлический кожух; 7 — сопла тангенциального ввода вторичного воздуха; 8 — взрывной клапан; 9 — форсунка для подачи сточных вод; 10 — камера с затвором для удаления золы.

Гидравлический расчет таких топок, количество и теплосодержание газов, а также размеры камеры можно определить по методике расчета энергетических топок [73].

На рис. 49 приведена схема установки для обезвреживания сточных вод с применением горизонтальной циклонной печи. Проект печи разработан ГИПРООРХИМом совместно с НИОПИК.

ПСВ-г с содержанием до 36,3% органических веществ и 4,3% неорганических солей поступает в концентратор 1, где происходит нагревание отходов до  $100^\circ C$  и отгонка с паром легколетучей органики. Нагревание сточных вод осуществляется с помощью горелки погружного горения. Пары легколетучих органических веществ направляются в башни, заполненные пиролюзитом, где при  $100^\circ C$  происходит каталитическое разложение органических продуктов. Нагретая до  $100^\circ C$  жидкость поступает в емкость 2 с расходом 0,5—2,5  $m^3/ч$ , откуда насосом 3 под давлением подается в форсунки, установленные в верхней части сушилки 9. Избыток сточных вод по отводной линии через клапан 4 возвращается в емкость. Распыливание жидкости осуществляется механическими форсунками навстречу дымовым газам, имеющим температуру в центре сушилки  $300—350^\circ C$ . Сухой продукт с температурой  $120—150^\circ C$  транспортируется

шнеком 15 в пневможелоб, где частицы продукта подхватываются воздухом и направляются в горизонтальную циклонную печь 11. Воздух в пневможелоб подается вентилятором 16. В циклонной печи за счет сжигания газа создается температура 1000—1300° С, при которой поступающий продукт плавится, а органические вещества, оставшиеся в продукте, полностью сгорают. Воздух для топливной форсунки подается вентилятором 12. Солевой плав через лоток самостеком поступает в кристаллизатор 10 под слой воды. Пульпа с кристаллами поступает на фильтры 14, где кристаллы отделяются.

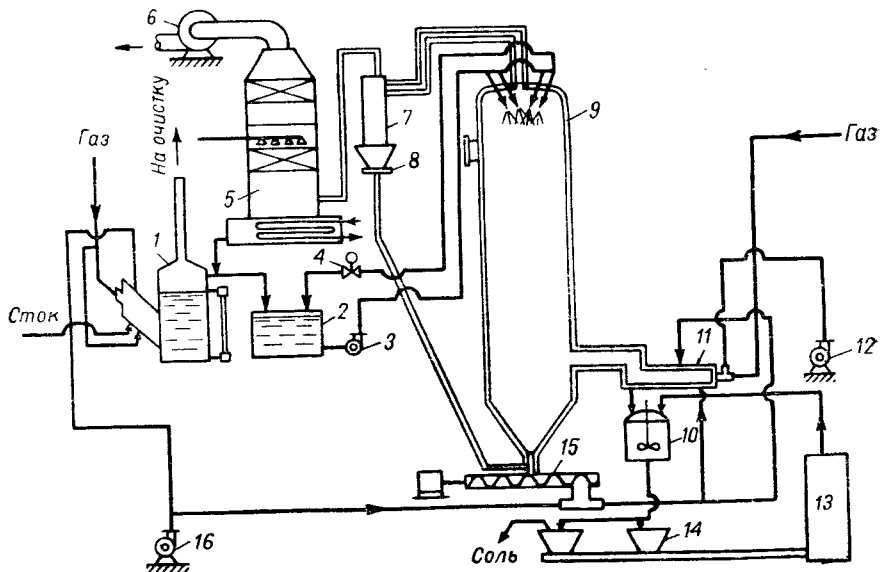


Рис. 49. Схема установки по обезвреживанию ПСВ-г:

1 — концентратор; 2 и 13 — емкости; 3 — насос; 4 — клапан; 5 — скруббер; 6 — вентилятор; 7 — циклон; 8 — бункер; 9 — сушилка; 10 — кристаллизатор; 11 — циклонная печь; 12 и 16 — вентиляторы; 14 — фильтр; 15 — шнек.

а фильтрат возвращается с помощью погружного насоса, расположенного в емкости 13, в кристаллизатор. Дымовые газы с температурой 250° С поступают в циклон 7, где очищаются от частиц продуктов, уносимых с газами. Уловленные в циклоне частицы из бункера 8 по течке поступают в шнек и далее в циклонную печь. Газы с температурой 200° С из циклона подаются на окончательную очистку в скруббер 5, охлаждаются до 30° С и вентилятором 6 выбрасываются в атмосферу.

Подобная схема, но с установкой вертикальной циклонной печи применяется для обезвреживания сточных вод на Чебоксарском химическом комбинате [74].

Схема аналогичной установки по обезвреживанию небольших количеств ПСВ предложена НИОПИК совместно с ВТИ имени Дзержинского [55].

На наш взгляд использование сушилки для испарения влаги не оправдано, так как при этом твердые частицы уносятся вместе с парами и газами. Поэтому целесообразнее подавать все сточные воды в циклонную печь.

Начиная с 1964 г. на кафедре огневой промышленной теплотехники МЭИ совместно с ОКБ ЭТХИМ ведутся научно-исследовательские работы по применению циклонных печей для обезвреживания промышленных сточных вод. Работами кафедры показано, что по сравнению с горизонтальными в вертикальных циклонных печах лучше организованы процесс горения и выгрузка плава. Схема вертикальной

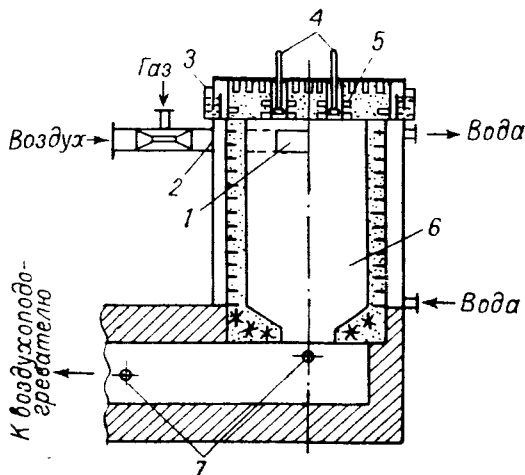


Рис. 50. Схема вертикальной циклонной печи:

1 — тангенциальное сопло газовой горелки; 2 — горелка; 3 — гидравлический затвор; 4 — центробежные форсунки; 5 — крышка циклона; 6 — циклон с водоохлаждаемой футеровкой; 7 — отверстия для отбора проб газа и замера температуры.

циклонной печи [75], предназначенной для стендовых испытаний, приведена на рис. 50.

Циклонная печь имеет внутренний диаметр 470 мм, высоту 550 мм. Внутри камера покрыта хромомagneзитовой обмазкой толщиной 30 мм. Состав обмазки (в %):

Хромомagneзитовый порошок . . . . .	88
Огнеупорная глина . . . . .	7
Жидкое стекло . . . . .	5

Распыливание ПСВ-г осуществляется механическими центробежными форсунками.

На основании опытно-конструкторских разработок на Щекинском химическом комбинате ОКБ ЭТХИМ была пущена опытно-промышленная установка по термическому обезвреживанию ПСВ-г

производительностью 2,0—3,8 м<sup>3</sup>/ч, которая работает с декабря 1966 г. [76].

Установка, за исключением КИП и автоматики, размещена на открытой площадке и успешно работает. Размеры циклонной печи:

Внутренний диаметр . . . . .	1490 мм
Высота от оси горелок до пережима . . . . .	2720 мм
Диаметр пережима . . . . .	900 мм
Рабочий объем циклона . . . . .	5,4 м <sup>3</sup>

В 1967 г. на Черниговском комбинате синтетических волокон была пущена опытно-промышленная установка по сжиганию стоков производительностью 2,5 м<sup>3</sup>/ч (по сточной воде). Проект выполнен ОКБ ЭТХИМ совместно с МЭИ [77]. Характеристики работы установки таковы:

Количество ПСВ-г . . . . .	2,5 м <sup>3</sup> /ч
Количество расходуемого природного газа . . . . .	600 нм <sup>3</sup> /ч
Удельный расход газа . . . . .	240 нм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Удельная весовая нагрузка циклона по воде . . . . .	1180 т/(м <sup>3</sup> ·ч)
Тепловое напряжение объема циклона . . . . .	$2,1 \cdot 10^6$ ккал/(м <sup>3</sup> ·ч)
Коэффициент избытка воздуха за циклоном . . . . .	1,1
Температура дымовых газов за циклонной топкой . . . . .	900—1000° С
Температура дымовых газов перед дымовой трубой . . . . .	500° С

В литературе описаны результаты совместных исследований ОКБ ЭТХИМ и кафедры огневой промышленной теплотехники МЭИ [60, 76, 78, 79].

В настоящее время циклонные печи для сжигания ПСВ работают на ряде предприятий [80].

Циклонные топки по сравнению с шахтными и камерными обладают целым рядом преимуществ, связанных в первую очередь с лучшей организацией смешения воздуха с топливом, что позволяет резко увеличить теплонапряжение топочного объема без ухудшения полноты сгорания. В циклонных топках резко удлиняется процесс сжигания во времени и сравнительно просто решается вопрос о выгрузке плава.

Недостатком циклонных печей являются частичный унос солевой массы газом и загрязнение поверхностей котлов-утилизаторов. Иногда для легкоплавких солей унос может составлять до 60—70% от всей массы.

### Сжигание ПСВ-г в печах с псевдооживленным слоем

В последние 5 лет для сжигания промышленных сточных вод начинают успешно применяться печи с псевдооживленным слоем. Впервые печи с псевдооживленным слоем были использованы для обезвреживания сточных вод бумажной промышленности [81]. Принципиальная схема работы печи представлена на рис. 51.

Вначале печи с псевдоожиженным слоем использовались для сжигания органических веществ, находящихся в отходах. Дальнейшими исследованиями было показано, что остатки от сжигания являются полезными продуктами и могут быть вторично использованы в производстве.

Схема обезвреживания нейтральных отходов сульфитных щелоков в печи с псевдоожиженным слоем приведена на рис. 52.

Схема обезвреживания щелоков на магнетитной основе в печи с псевдоожиженным слоем показана на рис. 53.

Сжигание черных щелоков с добавлением серы в печах с псевдоожиженным слоем с целью получения сульфата натрия в результате обезвреживания осуществлено компанией Грин Бэй (Green Bay Packaging Incorporated) [82]. Схема установки по сжиганию стоков в печи с псевдоожиженным слоем производительностью 200 т/сутки щелоков с содержанием твердых веществ 44% приведена на рис. 54.

Разбавленный сульфитный щелок с концентрацией 8—10% твердых веществ из бака 1 поступает в испаритель, где концентрируется до 22%, после чего через бак-хранилище 3 центробежным насосом подается в скруббер Вентури 4, где смешивается с бытовыми газами. За счет тепла дымовых газов сточные воды концентрируются до 44% и через циклонный сепаратор 5, емкость 11 поступает в бак-смеситель 9, где они смешиваются с серой, предварительно размолотой в шаровой мельнице 10. За счет введения серы концентрация твердых веществ в сточных водах увеличивается до 85%. Пастообразная масса подается в реактор с псевдоожиженным слоем 8. Зола, образующаяся при сгорании с размерами частиц 1—5 мм, выгружается из печи непрерывно. Состав золы: 85—97%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и 15—3%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Дымовые газы, пройдя циклон 7, поступают в скруббер Вентури 4 и через сепаратор 5 и дополнительный скруббер 6 выбрасываются в атмосферу. Рабочая температура в камере сгорания 750° С, температура в слое 110° С. Конструкция печей для сжигания стоков в псевдоожиженном слое разработаны фирмой Дорр-Оливер (США) приведены ранее [35]. Окупаемость установки 5—7 лет, стоимость затрат на переработку 1 т сточных вод составляет 2,25 доллара.

Исследования и расчеты, проведенные американскими инженерами, показывают, что печи с псевдоожиженным слоем в скором будущем найдут широкое применение для обезвреживания

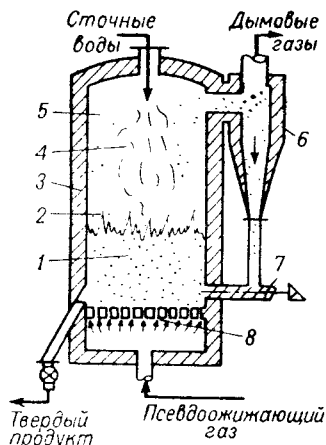


Рис. 51. Схема работы печи с псевдоожиженным слоем:

1 — плотная фаза оживленного слоя; 2 — разбавленная фаза оживленного слоя; 3 — печь; 4 — распределительная решетка; 5 — загрузочный материал; 6 — циклонный сепаратор; 7 — труба для возврата материала; 8 — газораспределительная решетка.

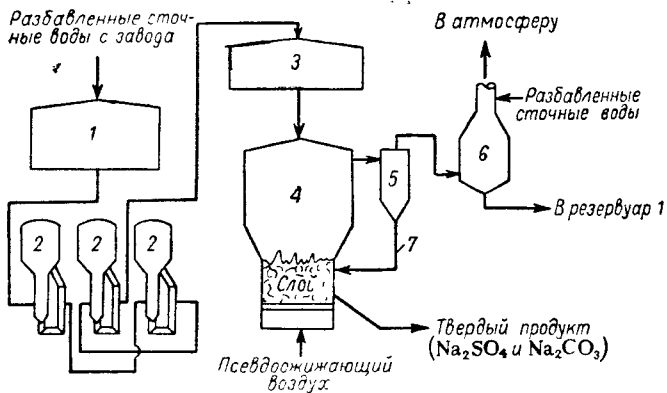


Рис. 52. Схема обезвреживания сульфитного щелока в печи с псевдооживленным слоем.

1 — бак для разбавленных сточных вод (9—10% солей); 2 — батарея испарителей; 3 — резервуар для концентрированных сточных вод (35% солей); 4 — реактор с псевдооживленным слоем; 5 — циклон; 6 — скруббер; 7 — возвратная труба.

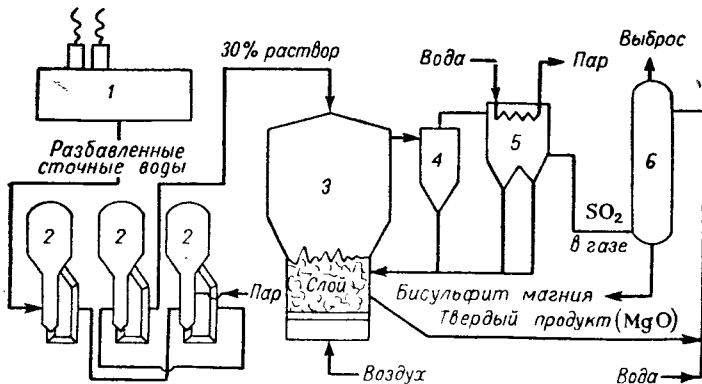


Рис. 53. Схема сжигания магниевых щелоков в печи с псевдооживленным слоем:

1 — завод; 2 — батарея испарителей; 3 — реактор с псевдооживленным слоем; 4 — циклон; 5 — бойлер; 6 — абсорбционная башня.

промышленных сточных вод из-за простоты конструкции и компактности, из-за возможности полного обезвреживания промышленных отходов с одновременным получением гранулированных минеральных солей и из-за возможности полной автоматизации процесса.

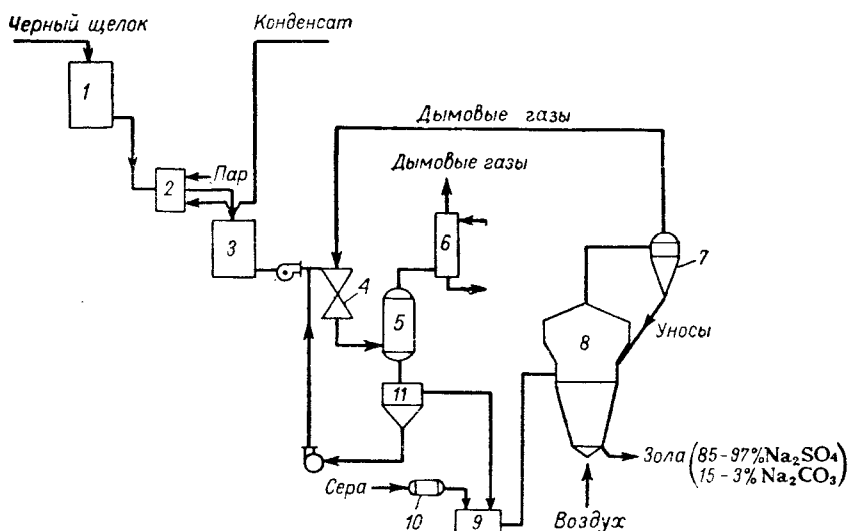


Рис. 54. Схема сжигания черного щелока с добавкой серы в печи с псевдоожиженным слоем:

1 и 3 — бак-хранилище для разбавленного черного щелока; 2 — испаритель-конденсатор; 4 — скруббер Вентури; 5 — циклон-сепаратор; 6 — вторичный скруббер (сюда же подается холодная скрубберная жидкость); 7 — циклон; 8 — реактор с псевдоожиженным слоем; 9 — бак-смеситель; 10 — шаровая мельница; 11 — рециркуляционный бак.

### Обезвреживание ПСВ-г методом «мокрого сжигания»

Впервые на возможность применения метода «мокрого сжигания» для обезвреживания ПСВ-г указали в 1913—1920 гг. Стреленерт [83] и Фишер [84, 85]. Однако практическое применение этот метод в то время не получил из-за большой стоимости аппаратного оформления процесса и наличия большого числа водоемов для сброса ПСВ-г.

В период с 1920 по 1957 гг. проведен целый ряд исследований по возможному обезвреживанию ПСВ-г бумажных и лесохимических заводов [86—88] и БСВ [89] методом «мокрого сжигания».

В 1957 г. на Юго-Западной станции Главного санитарного управления г. Чикаго впервые была построена и введена в эксплуатацию опытная установка по обезвреживанию БСВ методом «мокрого сжигания».

Производительность установки в расчете на сухой окисляемый остаток БСВ составляет 2 т/сутки [90—92]. Практически возможны два варианта осуществления процесса обезвреживания ПСВ-г и БСВ

методом «мокрого сжигания» — при постоянном давлении и постоянном объеме. Обезвреживание ПСВ-г и БСВ при постоянном давлении получило название процесса Циммермана [93—100].

Циммерманом предложено несколько схем осуществления процесса обезвреживания БСВ методом «мокрого сжигания» [101—103], некоторые из них приведены на рис. 55 и 56.

На рис. 55 приведена схема установки по обезвреживанию БСВ при постоянном давлении с отдельной подачей в реактор воздуха и сточных вод подвергнутого очистке [104].

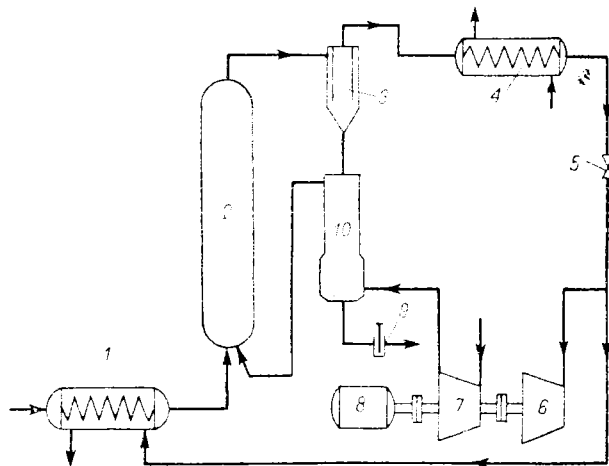


Рис. 55. Схема непрерывной установки по обезвреживанию БСВ методом «мокрого сжигания» при постоянном давлении:

1 и 4 — теплообменники; 2 — реактор; 3 — сепаратор; 5 — регулирующий клапан; 6 — турбина; 7 — компрессор; 8 — генератор; 9 — автоматическая задвижка; 10 — увлажнитель.

БСВ через теплообменник 1 поступает в реактор 2, где подвергается окислению кислородом воздуха, поступающего в реактор из увлажнителя 10. Воздух, необходимый для процесса, компрессором 7 подается в увлажнитель, в котором нагревается до нужной температуры за счет тепла обработанной жидкости.

Газо-жидкостная смесь из реактора поступает в сепаратор 3, где разделяется на жидкость, поступающую в увлажнитель, и газ, энергия которого используется для вращения турбины 6. Обезвреженные сточные воды через автоматическую задвижку 9 выводятся из установки, а газ через теплообменник 4, через регулирующий давление в системе клапан 5 поступает в блок регенерации энергии газа, состоящий из турбины, компрессора и генератора 8. Подача воздуха в реактор через увлажнитель осуществляется с целью эффективного нагревания воздуха при непосредственном контакте его с горячими обезвреженными сточными водами и десорбции из последнего неокисленных летучих органических веществ.

На рис. 56 приведена схема опытной установки [90] по обезвреживанию БСВ при постоянном давлении и совместной подаче в реактор воздуха и сточных вод. БСВ, содержащее первичный и активный ил городской биоочистительной станции, из расходных емкостей 1 при 30° С питательным насосом 3 подаются через насос высокого давления 4 в теплообменник 6', куда одновременно с БСВ подается воздух компрессором 5.

Нагревание БСВ в расходных емкостях осуществляется через подогреватели 2. Газо-жидкостная смесь проходит систему теплообменников 6', 6, где нагревается до 238° С за счет обезвреженных

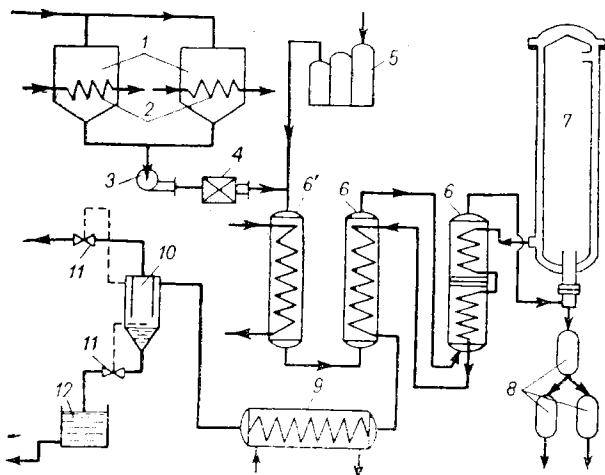


Рис. 56. Схема опытной установки производительностью 2 т/сутки:

1 и 12 — емкости; 2 — подогреватели; 3 — насос; 4 — насос высокого давления; 5 — компрессор; 6', 6 и 9 — теплообменники; 7 — реактор; 8 — дренажная система; 10 — сепаратор; 11 — клапаны.

сточных вод, и поступает в реактор 7. Твердый остаток, образующийся после обезвреживания, выгружается из реактора через дренажную систему 8. Газо-жидкостная смесь, выходящая из реактора, проходит последовательно теплообменники 6, 9 и с температурой 65° С поступает в сепаратор 10, где разделяется на газ и жидкость. Постоянство давления в системе поддерживается регулируемыми клапанами 11. Газ выбрасывается в атмосферу, а жидкость поступает в сборную емкость 12.

Теплообменник 6' используется при пуске установки для подогрева исходной газо-жидкостной смеси до температуры процесса. Рабочие параметры процесса: давление 84 атм, температура в реакторе 260° С.

В табл. 6—8 приведены опытные данные по работе этой установки. Из данных, приведенных в табл. 6, 7, видно, что полнота

обезвреживания сточных вод зависит от режима процесса, а именно, от температуры и давления [92]. На рис. 57 приведена зависимость степени окисления органических веществ, находящихся в БСВ, от продолжительности процесса.

Таблица 6

Результаты опытов по обезвреживанию БСВ  
(А — активированный ил; Р — первичный ил)

№ опыта	Тип осадка	Количество обра- ботанного осадка, г	Продолжитель- ность, ч	Содержа- ние приме- сей, %		Использованный воздух, г/г	Теплотворная спо- собность сточных вод, ккал/г	Температура в реак- торе, °С	Полнота обезврежи- вания, %	Зола в нераствори- мых веществах после окисления, %
				твердые вещества	летучие вещества					
1	А	750	8	3,1	2,0	0,132	120	260	90	85,3
2	50%Р—50%А	1 450	24	4,2	2,9	0,252	210	270	94,5	89,4
3	50%Р—50%А	2 700	45	3,5	2,3	0,156	140	260	92,1	87,7
4	Р	3 270	64	4,8	3,5	0,246	220	270	96,0	90,3
5	А	2 540	46	3,6	2,2	0,144	120	250	92,0	88,4
6	60%Р—40%А	8 800	141	4,7	3,2	0,264	210	270	91,8	84,1
7	Р	7 000	131	6,0	4,2	0,288	260	270	95,6	90,4
8	50%Р—50%А	20 600	366	4,9	3,4	0,240	210	260	93,1	86,0
9	50%Р—50%А	2 540	42	6,6	4,8	0,312	260	260	94,1	86,3
10	50%Р—50%А	5 270	84	7,0	5,0	0,360	300	270	93,9	86,8

Таблица 7

Результаты опытов по обезвреживанию БСВ

Условия процесса			Пределы исходных кон- центраций твердых веществ в БСВ, %	Характеристика исходной БСВ			рН	Характеристика обезвреженной БСВ			рН	Снижение		
расход БСВ, л/ч	давление, атм	температура, °С		всего твердых веществ, %	летучие веще- ства, %	XПК, г/г		всего твердых веществ, %	летучие вещества, %	XПК, г/г		твердых ве- ществ, %	летучих веществ, %	XПК, %
58	86	250	3,00—3,99	3,58	2,40	45,8	—	4,08	0,30	10,1	—	10,1	87,4	78,0
65	85	260	4,00—4,99	4,43	2,93	56,9	6,5	1,48	0,35	11,5	7,6	65,6	87,1	79,9
58	85	260	5,00—5,99	5,23	3,49	63,6	4,8	1,76	0,40	13,9	7,8	65,7	87,6	78,1
88	86	270	6,00—6,99	6,27	4,53	81,7	7,1	1,40	0,34	16,8	7,6	77,6	92,4	79,4
91	84	260	7,45*	7,45	4,08	66,2	7,7	3,81	0,60	12,7	7,9	48,8	85,4	80,8

\* Центрифугированный активированный осадок с содержанием золы 43,3%.

## Характеристика обезвреженной БСВ

Пределы концентрации исходных веществ в исходной БСВ, %	Жидкость					Осадок в стоке		
	азот в аммонийной форме, мг/л	органический азот, мг/л	летучие органические кислоты, мг/л	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	БПК, мг/л	ХПК, мг/л	объем осадка (зола) через 1 ч отстаивания, мг/л
3,00—3,99	1220	313	—	4990	10 100	4010	8 400	—
4,00—4,99	1400	442	2960	5760	11 500	5280	8 300	100
5,00—5,99	1650	482	4090	7600	13 900	6590	10 500	116
6,00—6,99	1780	535	3960	8570	16 800	6870	11 500	116
7,45*	1910	554	2790	5880	12 700	5580	9 300	139

\* Центрифугированный активированный осадок с содержанием зола 45,3%.

На рис. 58 приводится зависимость снижения ХПК сточных вод от температуры процесса при продолжительности процесса 1 ч.

Аналогичные зависимости были получены при обезвреживании ПСВ-г лесохимических производств [86, 122].

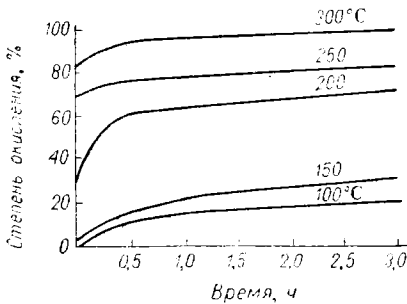


Рис. 57. Зависимость степени окисления органических веществ БСВ от времени.

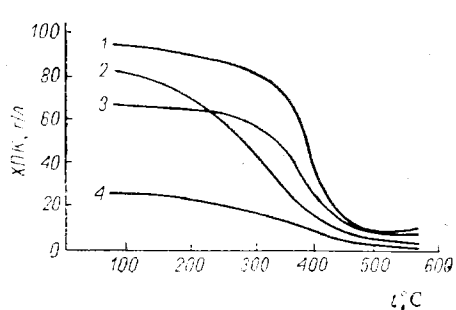


Рис. 58. Зависимость снижения ХПК сточных вод от температуры процесса при концентрации твердых веществ в сточных водах БСВ (в вес. %):

1 — 8,9; 2 — 11,4; 3 — 6,2; 4 — 2,0.

Обезвреживание осадков БСВ методом «мокрого сжигания» на установках подобных установке, построенной в г. Чикаго, осуществляется в городах Уиллинг (штат Западная Виргиния), Уаусау, Южная Милуоки (штат Висконсин), Рай (штат Нью-Йорк) [105—107]. Данные работы установок приведены в табл. 9.

На рис. 59 приведена схема установки, построенной в Норвегии для обезвреживания ПСВ-г целлюлозно-бумажного комбината, производительностью 500 м<sup>3</sup>/сутки [105].

Технические данные работы действующих установок по обезвреживанию осадков БСВ методом «мокрого сжигания»

Место строительства установки	Год пуска	Характеристика сточных вод		Условия процесса			Потребляемая мощность, кВт	Степень очистки	
		содержание твердых веществ, ‰	содержание зольности в твердых веществах, %	температура, °С	давление, атм	расход воздуха, кг/мин		по ХПК, %	по не растворимым веществам, ‰
г. Чикаго	1961	3	35	274	122	163,4	1650	75	90
г. Уиллинг	1961	7,5	45	260	80	17	165	60	90
г. Уаусау	1960	8,5	56	224	116	10,6	110	75	92
г. Южная Малуоки	—	7,7	46,3	222	31	2,3	30	40	70
г. Рай	1963	5,6	30	238	49	3,2	30	65	90

Рабочие параметры процесса: давление 150 атм, температура 310° С. На установке имеется два параллельно работающих реактора диаметром 1,8 м и высотой 18,3 м каждый.

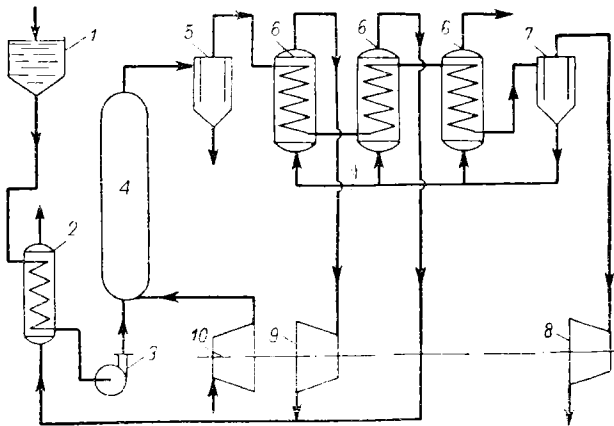


Рис. 59. Схема установки обезвреживания ПСВ-г (типа В-2,3 Г-2Д):

1 — расходная емкость; 2 — теплообменник; 3 — насос высокого давления; 4 — реактор; 5 и 7 — сепараторы; 6 — парогенераторы; 8 — газовая турбина; 9 — паровая турбина; 10 — компрессор.

Расход воздуха на окисление составляет 1270 м<sup>3</sup>/ч. Установка не нуждается в постороннем источнике энергии и дает на сторону значительное количество технологического пара. Капитальные затраты на установку составили 3 млн. руб. Подобная установка производительностью 200 м<sup>3</sup>/сутки ПСВ-г построена в г. Химершилд (Швеция) [105, 108, 109].

Для обезвреживания ПСВ-г бумажной фабрики, расположенной в г. Ротшильд (США), построена установка, отличительной особенностью которой является совмещение процессов окисления в жидкой и газовой фазах. Для окисления органических продуктов, находящихся в газовой фазе, используется платиновый катализатор. На этой установке наряду с удовлетворением энергетических потребностей технологического процесса удалось получить избыточное количество энергии, составляющее 14 *квт* на каждые 0,680 *м<sup>3</sup>* сточных вод [104].

По проекту ГИАИ на Лисичанском химическом комбинате была построена и некоторое время эксплуатировалась полупромышленная установка по обезвреживанию ПСВ-г производства капролактама [110—112]. Производительность установки 80 *м<sup>3</sup>/сутки*. Условия процесса: температура 270° С, давление 100 *атм*.

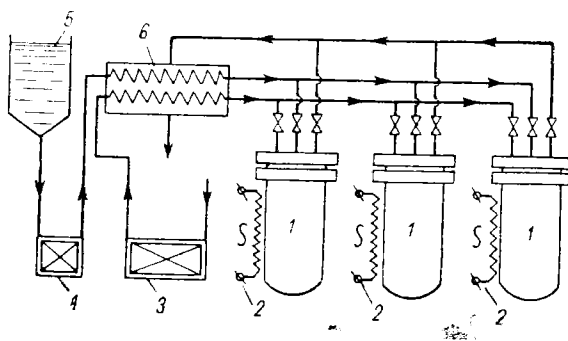


Рис. 60. Схема установки обезвреживания ПСВ-г при постоянном объеме:

1 — автоклав; 2 — электроподогреватель; 3 — компрессор;  
4 — насос; 5 — расходная емкость; 6 — теплообменник.

В исходной ПСВ-г содержится 3,7—4,2 *г/л* органических веществ, в основном, адипината натрия, и до 4,8 *г/л* неорганических солей. ХПК обезвреженной ПСВ-г составляет 180—250 *мг/л*.

В качестве реактора использованы 10 труб диаметром 0,2 м и высотой 12 м, соединенных последовательно. В процессе эксплуатации установки были выявлены некоторые конструктивные и технологические недостатки, приводившие к забивке трубопроводов и аппаратов неорганическими продуктами.

Обезвреживание ПСВ-г методом «мокрого сжигания» может быть осуществлено при постоянном объеме. В этом случае установка состоит из периодически работающего автоклава, имеющего электрообогрев, воздушного компрессора, небольшой производительности, и насоса, подающего ПСВ-г в автоклав. На рис. 60 приведена схема установки обезвреживания ПСВ-г при постоянном объеме [113].

Подобная установка была построена для обезвреживания ПСВ-г кожевенных заводов и осадков из отстойников [114, 115].

ХПК и степень окисляемости некоторых органических веществ [123, 124]

№ по пор.	Вещество	ХПК, г кислорода/г вещества	Окисляемость, %	№ по пор.	Вещество	ХПК, г кислорода/г вещества	Окисляемость, %
1	Акриловая кислота	1,33	100	56	Мочевина	—	48
2	Акролеин	1,981	81,3	57	Муравьиная кислота	0,35	100—97
3	Аланин	—	77	58	α-Нафтол	—	98
4	Алловый спирт	2,20	99,5	59	Никлиновая кислота	—	3
5	Анилин	2,41	104—96	60	Нитробензол	—	95
6	Арабиноза	—	93	61	Нитрофенол	—	92
7	Ацетальдегид	1,817	100	62	Октанол	2,95	100
8	Ацетамид	1,08	90	63	Олеиновая кислота	—	88
9	Ацетон	2,17	230—91	64	Пальметиновая кислота	2,87	100
10	Ацетоуксусный эфир	1,721	79	65	Пентанол	2,73	100
11	Бензойная кислота	2,00	100—93	66	Пиперидин	—	88
12	Бензол	3,07	99—24	67	Пиридиноградная кислота	—	88
13	n-Бензохинон	—	98	68	Пирогаллол	—	95
14	Бис(2-этилгексил) фенилфосфат	—	—	69	Пирокатехин	1,89	100—97
15	Бутанол	2,6	100	70	Пириролин	—	69
16	Винилацетат	1,673	100	71	Пиррол	—	88
17	Винилиден хлористый	0,825	100	72	Пропионовая кислота	1,51	100
18	Виннокаменная кислота	—	98	73	Раффиноза	—	83
19	Галлуровой кислоты этиловый эфир	—	96	74	Резорцин	1,89	100
20	Гидрохинон	1,89	100	75	Салициловая кислота	2,90	94—96
21	Гистидин	—	101	76	Сарбоза	—	96
22	Глицерин	1,22	100—97	77	Сахароза	—	97
23	Декстроза	—	99	78	Скатола	—	95
24	4,4-Диметилдиоксан-1,3	1,20	—	79	Стирол	—	69
				80	Стеариновая кислота	2,94	100—77
				81	Тимол	—	94

25	Диметилформамид . . . . .	4,535	94	Тирозин . . . . .	93
26	Диоксан . . . . .	—	96	Толуол . . . . .	99,4—27
27	Диацетамин . . . . .	2,95	100	Трибутилфосфат . . . . .	—
28	Дивинилглицоль . . . . .	1,27	84	Трионин . . . . .	94
29	Дихлоруксусная кислота . . . . .	0,592	100	Триггофан . . . . .	76
30	Изобутилациагат . . . . .	2,20	95	Трифенилфосфат . . . . .	—
31	Изомасляная кислота . . . . .	—	96	Триэтиламин . . . . .	83,3
32	Изооктан . . . . .	—	0	Уксусная кислота . . . . .	100—99
33	Изопрен . . . . .	3,24	98	Уксуснокислый кальций . . . . .	—
34	Имидазол . . . . .	—	132	Фенилаланин . . . . .	93
35	Индол . . . . .	—	100	Фенилуксусная кислота . . . . .	100
36	Канифольное масло . . . . .	2,1	—	Фенол . . . . .	100—97
37	Коричная кислота . . . . .	—	96	Формальдегид . . . . .	100
38	Крахмал . . . . .	—	85	Фталевая кислота . . . . .	77,5—97
39	o-м-п-Крезолы . . . . .	2,52	122	Фумаровая кислота . . . . .	93
40	o-Крезол . . . . .	—	95	Фурафурол . . . . .	93
41	Кротоновый альдегид . . . . .	2,285	101	Хлорол . . . . .	65
42	Кензол . . . . .	3,17	100	Хлорбензол . . . . .	44
43	Лактовитрил . . . . .	1,35	—	Хлорметан . . . . .	74
44	Лизин . . . . .	—	88	Хлорфенол . . . . .	108
45	Лимонная кислота . . . . .	—	98	Хлороформ . . . . .	97
46	Маннит . . . . .	—	99	Циклогексанол . . . . .	86
47	Масляная кислота . . . . .	1,82	100	Четыреххлористый углерод . . . . .	100
48	Масляный альдегид . . . . .	2,44	100	Щавелевая кислота . . . . .	98
49	Меламил (циануртриамид) . . . . .	1,416	114	Этилацетат . . . . .	1 875
50	Метакриламид . . . . .	1,695	96,4	Этиленглицоль . . . . .	103
51	Метанол . . . . .	1,50	100	Этиленгликоль . . . . .	123
52	3-Метилбутаноид . . . . .	2,14	100	Этиленхлоргидрин . . . . .	94,6
53	o-Метилстирол . . . . .	3,11	99,7	Этанол . . . . .	100—94
54	Миндальная кислота . . . . .	93	—	Этиловый эфир . . . . .	121
55	Монохлоруксусная кислота . . . . .	0,592	100	Угарная кислота . . . . .	97

При обезвреживании ПСВ-г методом «мокрого сжигания» важное значение имеет энергетическая сторона процесса, определяющая его экономичность. Энергетика процесса зависит от теплотворной способности ПСВ-г, которая, в свою очередь, определяется видом органического вещества и его концентрацией в ПСВ-г. Теплотворная способность некоторых веществ и ПСВ-г приведены в табл. 10 [92].

Таблица 10

Теплотворная способность веществ и ПСВ

Органические вещества и сточные воды	Удельная калорийность стока, <i>ккал/кг сточных вод</i>	Расход окислителя для полного сжигания, <i>кг/кг</i>		Калорийность, <i>ккал/кг воздуха</i>
		кислород	воздух	
Органические вещества:				
водород . . . . .	34 000	7,94	34,34	990
этилен . . . . .	12 000	3,42	14,80	810
углерод . . . . .	7 900	2,66	11,53	690
щавелевая кислота	670	0,18	0,77	870
жидкое топливо . .	10 800	3,26	14,00	770
лактоза . . . . .	3 900	1,13	4,87	810
Сточные воды:				
черные сульфитные щелока . . . . .	4 400	1,32	5,70	770
полухимические бумажные отходы	3 200	0,96	4,13	775
первичный ил . . .	4 350	1,33	5,75	760
активированный ил	3 630	1,19	5,14	710

Для определения количества тепла, которое может быть выделено в процессе окисления органических веществ, применяется формула, предложенная Н. П. Дроздовым [120]:

$$Q_n = 3,2X_{ПК}$$

где  $Q_n$  — теплотворная способность сточных вод, *ккал/л*;  $X_{ПК}$  — химическое потребление кислорода, *г кислорода/л*.

При отсутствии опытных данных  $X_{ПК}$  ПСВ-г можно рассчитать исходя из состава органической части сточных вод.

В табл. 11 (см. стр. 60) приведены  $X_{ПК}$  и степень окисляемости некоторых органических веществ.

Энергия, выделяющаяся при окислении органических веществ сточных вод в реакторе, выводится из него в виде энергии газожидкостной смеси, которая может быть преобразована в механическую, электрическую или тепловую [116, 117]. При достаточной калорийности сточных вод и рациональном использовании энергии паро-газа, выходящего из реактора, установка может быть обеспечена полностью тепловой и механической энергией для осуществле-

ния процесса обезвреживания. В табл. 12 приведены возможные варианты энергетического баланса установки обезвреживания ПСВ методом «мокрого сжигания» [92, 112].

Таблица 12

**Варианты энергетического баланса установки обезвреживания ПСВ методом мокрого сжигания в зависимости от калорийности сточных вод**

Калорийность сточных вод, ккал/кг	Концентрация органических веществ в сточных водах*, %	Самообеспечение энергией		Отдача энергии на сторуону
		тепловой	механической	
< 200	< 3	Нет	Нет	Нет
200—400	3—6	Обеспечена	Частично	»
400	6	»	Обеспечена	»
> 400	> 6	»	»	Осуществима

\* Теплотворность органических веществ в сточных водах принята равной теплотворности условного топлива, т. е. 7000 ккал/кг.

Достигнутые к настоящему времени результаты в практическом применении метода мокрого сжигания для обезвреживания сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности, уничтожению осадков биологических очистных сооружений городских станций, а также промышленных сточных вод ряда химических предприятий позволяют предположить дальнейшее развитие этого метода. Метод «мокрого сжигания» может быть применен к обезвреживанию органических веществ различного состава и строения и использован при очистке ПСВ-г, для которых до сих пор еще нет эффективных методов [118, 121].

Широкое внедрение данного метода в промышленность для обезвреживания ПСВ-г затруднено ввиду отсутствия методики расчета подобных установок [119]. Поэтому в Приложении дается методика расчета установки по обезвреживанию ПСВ-г методом «мокрого сжигания» при постоянном давлении процесса.

### Глава 3

## ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ

Очистка промышленных отбросных газов, содержащих токсичные вещества, для сохранения чистоты воздушного бассейна является в настоящее время непременным требованием во всех производствах. Для выполнения этих условий в зависимости от физико-химических свойств веществ, содержащихся в промышленных газообразных отходах (ПГО), и от требований, предъявляемых к степени очистки сбрасываемых газообразных продуктов, применяются различные способы очистки ПГО (механические, физико-химические, химические и термические). Примерный состав продуктов, находящихся в ПГО, в зависимости от характера производства приведен в табл. 13.

Таблица 13

Химический состав газообразных отходов

№ по пор.	Вид производства	Химический состав газообразных отходов
1	Переработка нефти	Меркаптаны, сероводород, аммиак, органические соединения азота, окись углерода
2	Производство газа из каменного угля	Соединения серы (сероводород, сероуглерод, тиофен, тиолы, сероокись углерода)
3	Переработка природного газа	Сероводород, меркаптаны
4	Производство кислот и щелочей	Окислы азота, кислородные соединения серы
5	Производство минеральных и органических удобрений	Аммиак, соединения серы, фтористый водород, меркаптаны, триметиламин и др.
6	Химические заводы (по производству смол, лаков, пластмасс, жиров, масел и т. д.)	Формальдегид, амины, амиды, растворители, соединения серы, ацетилен, фенол и др.
7	Фармацевтические заводы, пивоваренные заводы, процессы сбраживания	Амины, восстановленные соединения серы, фурфурол, метанол
8	Текстильные и бумажные фабрики	Мочевина, продукты распада крахмала, диметилсульфид

Для правильного применения различных методов очистки как в отдельности, так и в комбинации друг с другом, с целью наиболее полного обезвреживания ПГО необходима в первую очередь классификация ПГО. На основе анализа литературных данных по очистке и обезвреживанию ПГО различными методами [125] нами предложена классификация ПГО и методов их обезвреживания, составленная по следующему принципу. Все ПГО разделены на две основные группы:

1) ПГО-т — промышленные газообразные отходы, содержащие токсичные компоненты в виде твердых включений, пыли;

2) ПГО-г — промышленные газообразные отходы, содержащие токсичные компоненты в виде паров или газов.

В свою очередь промышленные газообразные продукты, содержащие токсичные вещества в твердом и газообразном виде (ПГО-т и ПГО-г), делятся на группы, характеризующиеся физико-химическими свойствами токсичных продуктов.

ПГО-т состоит из двух групп:

1) ПГО-тм — промышленные газообразные отходы, содержащие пылевидные вещества минерального происхождения (соли минеральных кислот, асбест);

2) ПГО-то — промышленные газообразные отходы, содержащие пылевидные вещества органического происхождения.

ПГО-г состоит из трех групп:

1) ПГО-гм — промышленные газообразные отходы, содержащие токсичные вещества неорганического происхождения, находящиеся в газо- или парообразном состоянии (например, HF, HBr, HI).

2) ПГО-го — промышленные газообразные отходы, находящиеся в газо- или парообразном состоянии, содержащие токсичные вещества органического происхождения, в состав которых не входят галогены, фосфор, сера, азот.

3) ПГО-гом — промышленные газообразные отходы, находящиеся в газо- или парообразном состоянии, содержащие токсичные вещества органического происхождения, в состав которых входят галогены, азот, фосфор, сера.

Предлагаемая классификация промышленных газообразных отходов и методов, применяемых для их очистки, приведена в табл. 14.

Метод сжигания вредных примесей, способных окисляться, находит все более широкое применение в промышленной практике для очистки дренажных и вентиляционных выбросов производств основного органического синтеза. Этот метод выгодно отличается от других (например, мокрой очистки в скрубберах) более высокой степенью очистки, отсутствием в большинстве случаев коррозионных сред и исключением сточных вод. Как правило, примеси сжигаются в печах с использованием газообразного или жидкого топлива. Иногда на практике представляется возможным окислить органические вещества, находящиеся в газовых выбросах, на поверхности катализатора, что дает возможность понизить температуру процесса.

**Классификация промышленных газообразных отходов и методов  
их обезвреживания**

Вид	Группа	Характеристика	Методы очистки и обезвреживания
ПГО-г	ПГО-гм	Абразивная пыль, минеральные соли (фосфаты, арсенаты, мышьяк, соединения ртути)	Механическая очистка; абсорбционная очистка
	ПГО-го	Древесная пыль, табачная и мучная пыль, угольная пыль и др.	Механическая очистка; абсорбционная очистка; термическое обезвреживание в печах
ПГО-г	ПГО-гм	HF, HCl, HI, HBr, F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> , I <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Hg и др.	Абсорбционная очистка; электрохимическая очистка; сорбционная очистка
	ПГО-го	Органические кислоты, альдегиды, кетоны, CO, углеводороды, спирты, фуран и др.	Абсорбционная очистка с последующим сжиганием паров; каталитическое дожигание; сжигание в печах
	ПГО-гом	Галогенорганические соединения, амины, тиазол, пиразолы, пирридыны, пирролы и др.	Каталитическое сжигание с последующей абсорбционной очисткой; сжигание в печах с последующей абсорбционной очисткой

Существует несколько вариантов процесса термического обезвреживания ПГО в печах с использованием и без использования катализаторов [126]. На рис. 61 приведены возможные варианты такого процесса.

По схеме *A* отходящие газы поступают на дожигание в печь. В форкамере 2 они нагреваются за счет тепла, образующегося при сгорании топлива в горелке 1, и направляются в печь 3, где заканчивается окисление органических примесей. Дымовые газы выбрасываются в атмосферу.

По схеме *B*, в отличие от схемы *A*, для сжигания топлива используется газ, поступающий на очистку.

По схеме *B* отходящие газы перед дожиганием предварительно подогреваются за счет тепла дымовых газов в теплообменнике 4.

Схемы процесса *Г* и *Д* аналогичны схемам *B* и *B* соответственно, но в зоне печи 3 для окисления используется еще и катализатор 5.

Применение той или иной схемы процесса термического обезвреживания ПГО зависит и определяется физико-химическими свойствами веществ, находящихся в ПГО, и их токсичностью.

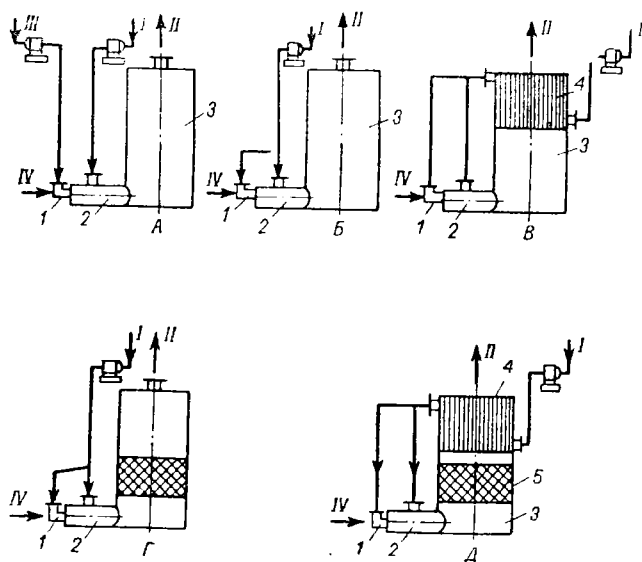


Рис. 61. Схемы возможных вариантов процесса термического обезвреживания газообразных отходов:

*I* — газ на очистку; *II* — очищенный газ; *III* — воздух для поддержания горения; *IV* — топливо; 1 — горелка; 2 — форкамера; 3 — печь; 4 — теплообменник; 5 — катализатор.

### Прямое сжигание ПГО в печах

Метод прямого сжигания промышленных газов, содержащих органические примеси, в пламенных печах и факелах известен уже более 100 лет, но несмотря на это применение его ограничивалось лишь сооружением отдельных установок как в СССР, так и за рубежом (США, Франция, ГДР и др.).

Чаще ПГО сжигаются совместно с твердыми и жидкими отходами промышленных производств с целью снижения затрат на осуществление процесса термического обезвреживания.

На рис. 62 изображена печь для сжигания (или разложения) дурнопахнущих и токсичных органических примесей отбросных газов от производства жирных кислот [127].

Печь представляет собой цилиндрическую футерованную камеру 3 с патрубками 2 для тангенциального подвода отбросных газов. В переднем торце камеры по оси устанавливается горелка 1 с осевым подводом части отбросных газов, тангенциальным подводом чистого воздуха и кольцевым подводом горячего газа. При такой конструкции печи большая часть ПГО-го направляется в топку, а примерно

25% от общего количества — прямым незакрученным потоком по осевому подводу горелки. Тангенциальный подвод чистого воздуха обеспечивает хорошее перемешивание его с горючим газом.

На рис. 63 показана печь для дожигания ПГО-го [128].

ПГО через штуцер 4 поступают в теплообменник 3, где нагреваются до температуры воспламенения, и далее через спиральный распределитель 1 в зону горения. В зоне горения установлены горелки 2, создающие короткое компактное цилиндрической формы пламя внутри корпуса. Для обеспечения полного сгорания горючих компонентов требуется сочетание определенной продолжительности пребывания ПГО в печи, температуры и турбулентности потока.

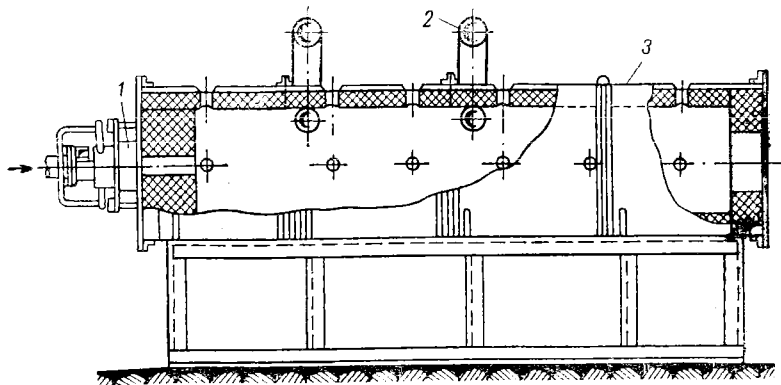


Рис. 62. Продольный разрез печи для сжигания отбросных газов производства жирных кислот (тип ПГО-го):

1 — горелка; 2 — цилиндрическая камера; 3 — патрубки для отбросного газа.

Для сжигания ПГО-г на заводах по переработке нефти используются различные конструкции печей [129—135].

На рис. 64 показана конструкция печи, предложенная фирмой John Zink Company [129] для сжигания газов с теплотворной способностью 150—300 ккал/м<sup>3</sup>.

Корпус печи 1 имеет прямоугольную форму. В верхней части корпуса имеется несколько прямоугольных отверстий 2, к которым подходят каналы для подачи ПГО-г 4. Каждый канал имеет замкнутый коллектор 3 для подачи воздуха, используемого в дальнейшем для горения. От коллектора отходят два ряда распределительных патрубков 5, расположенных навстречу друг другу. В патрубках имеются отверстия в торцах и на боковой поверхности, последние направлены в сторону и вниз. Такое расположение отверстий обеспечивает пересечение потоков ПГО-г струями воздуха. Для поджигания смеси газа используются горелки 7. ПГО-г, перемешанные с воздухом, нисходящим потоком подаются в камеру 10, ударяются о под 9, частично поворачиваются к фронтальной стене 6, проходят через перфорированную стенку 8 с площадью сечения 40%, выполняющую

роль направляющего устройства для газов и дополнительного поджигательного пояса. Развивающаяся в камере высокая температура обеспечивает полное сгорание органических продуктов. Продукты сгорания подаются в камеру 11 для утилизации тепла.

Теми же авторами предложено более простое устройство для сжигания газов нефтеперерабатывающих установок [132—134], изображенное на рис. 65.

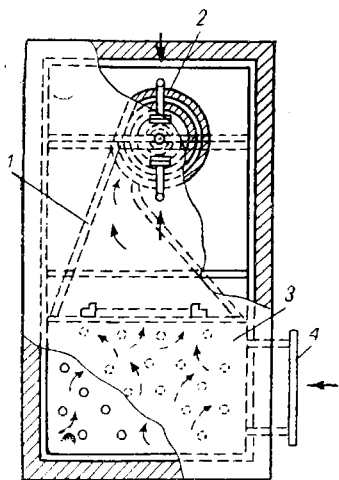


Рис. 63. Печь для сжигания ПГО-го:

1 — спиральный распределитель; 2 — горелка; 3 — теплообменник; 4 — штуцер для ввода загрязненного газа.

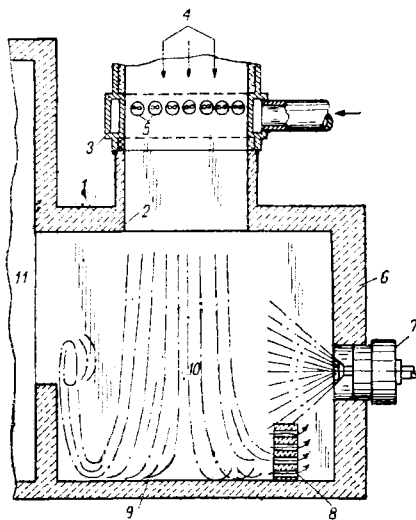


Рис. 64. Печь для сжигания газообразных отходов (тип ПГО-г).

1 — корпус печи; 2 — отверстие; 3 — коллектор; 4 — ПГО; 5 — распределительные патрубки; 6 — фронтальная стена; 7 — горелка; 8 — перфорированная стенка; 9 — под; 10 — камера; 11 — камера для утилизации тепла.

Устройство представляет собой вертикально расположенную трубу 10, имеющую в верхней части наконечник 6, образующий горизонтальную переборку с кольцевой выемкой 15, которая по периферии имеет ряды зажигаемых отверстий 16, 18, 19. ПГО поступают в трубу с нижнего конца. Переборка имеет волнообразное поперечное сечение, образуя кольцеобразный выступ 20 и кольцевую выемку, в которую направлены зажигаемые отверстия. Внутренние ряды отверстий 16 и 18 сходятся по направлению друг к другу, а внешний ряд 19 сходит по направлению к продолжению оси центрального отверстия 17 переборки 15.

По периферии переборка снабжена радиально расположенными прорезями, которые делают возможным отдельное расширение наконечника. Зажигание осуществляется расположенными по периферии и направленными внутрь горелками 4, снабжаемыми газо-воздушной смесью через трубки 2 и для поддержания пламени через трубки 1,

прикрепленные скобками 3 к ребрам 8 на трубе 10. Выше зоны горения для более полного окисления форсунками 5 на концах трубок 9, расположенными вертикально и направленными вверх от кольцевого паропровода 7, в трубу подается пар. Каждая форсунка имеет горизонтально расположенное отверстие 21, направленное вверх радиальное разгрузочное отверстие 22, два наклонных отверстия, расположенных на уровне выступа 20 и расходящихся от форсунки.

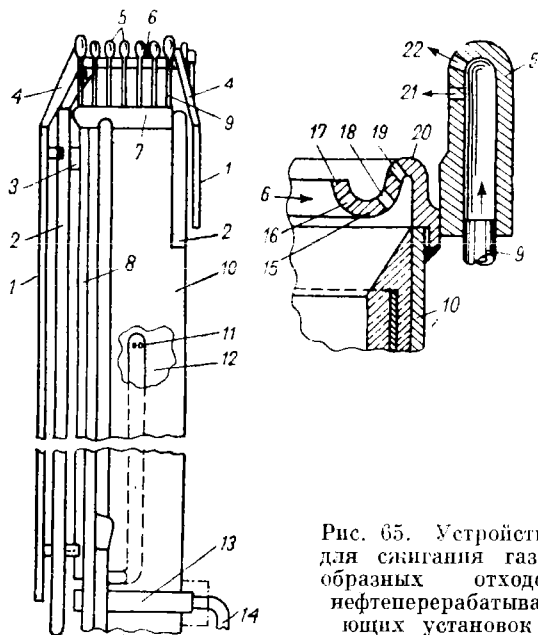


Рис. 65. Устройство для сжигания газобразных отходов нефтеперерабатывающих установок (тип ПГО-го, ПГО-то):

1 и 2, 9 и 12 — трубки; 3 — скобка; 4 — горелка; 5 — форсунки; 6 — наконечник; 7 — кольцевой паропровод; 8 — ребра; 10 — вертикальная труба; 11 — выходное отверстие; 13 — кожух; 14 — трубопровод; 15 — переборка с кольцевой выемкой; 16, 18 и 19 — зажигательные отверстия; 17 — центральное отверстие; 20 — выступ; 21 — горизонтальное отверстие форсунки; 22 — разгрузочное отверстие.

Шаровые форсунки 5 на каждой стороне горелок 4 расположены на более высоких выступах, чем остальные форсунки. Пар также подается в трубу 10 с помощью расположенной по оси трубки 12, имеющей выходные отверстия 11, которые преимущественно направлены радиально или горизонтально, но иногда могут быть наклонены. Кольцевой кожух 13 окружает два ряда отверстий. Капли конденсата собираются у переборки и проходят в кожух, а оттуда в трубопровод 14, чтобы поддерживать определенный уровень конденсата.

Печь конструкции Филлипса [130] приведена на рис. 66.

ПГО вводятся через четыре патрубка 1 навстречу друг другу. В патрубках с помощью выступов 2, расположенных по спирали,

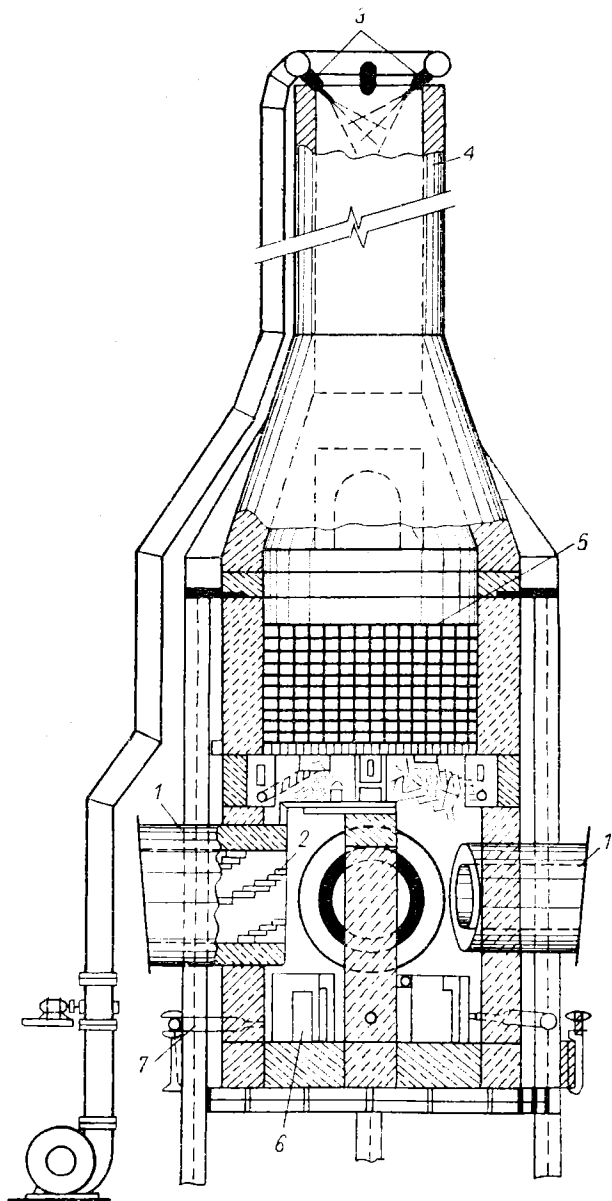


Рис. 66. Печь для сжигания газообразных отходов типа ПГО-го и ПГО-то:  
 1 — патрубок; 2 — выступ; 3 — сопло; 4 — верхняя часть дымовой трубы; 5 — слой битого кирпича; 6 — отверстия для подачи воздуха; 7 — горелка.

потоки газов закручиваются. Ниже уровня патрубков имеется несколько горелок 7, подающих тангенциально природный газ (или другой вид топлива). Рядом с регистрами этих горелок расположены отверстия 6 для подачи воздуха. Указанный способ подачи газов способствует интенсивному их перемешиванию. Смесь газов сжигается в камере, дожигание производится на развитой поверхности, выполненной в виде слоя битого кирпича 5. Скорость прохождения

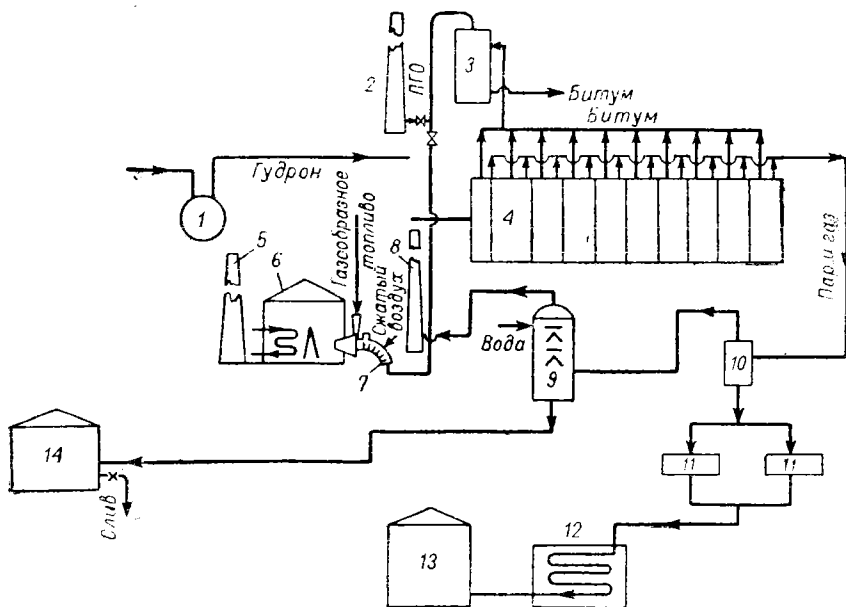


Рис. 67. Принципиальная схема установки по обезвреживанию и очистке ЛГО в производстве битумов:

1 — мойка; 2 и 8 — вытяжные трубы; 3 — промежуточная емкость; 4 — окислительная батарея; 5 — дымовая труба; 6 — трубчатая печь; 7 — форсунка; 9 — конденсатор смешения; 10 — сепаратор; 11 — фильтр; 12 — погружной холодильник; 13—14 — емкости.

газов через этот слой и время контакта определяются тягой. Последняя может регулироваться вдуванием потока воздуха через сопла 3 у верхней части дымовой трубы 4 и навстречу поднимающимся газам.

Для термического обезвреживания паров углеводородов и продуктов их окисления, образующихся при производстве битума, Всесоюзным научно-исследовательским институтом по технике безопасности в нефтяной промышленности (ВНИИТБ) предложена трубчатая печь, устанавливаемая на линии сброса ЛГО [134]. Принципиальная схема установки обезвреживания токсичных паров и газов приведена на рис. 67.

Пары углеводородов, увлеченные выходящим из окислительных батарей 4 воздухом, поступают в сепаратор 10, откуда, охладившись

до 80—90° С и частично освободившись от тяжелых углеводородов, направляются в конденсатор 9. Здесь они окончательно освобождаются от высших углеводородов, преимущественно от черного соляра. Газы из промежуточной емкости 3 и из конденсатора 9 поступают через форсунку 7 в трубчатую печь 6, где полностью сгорают.

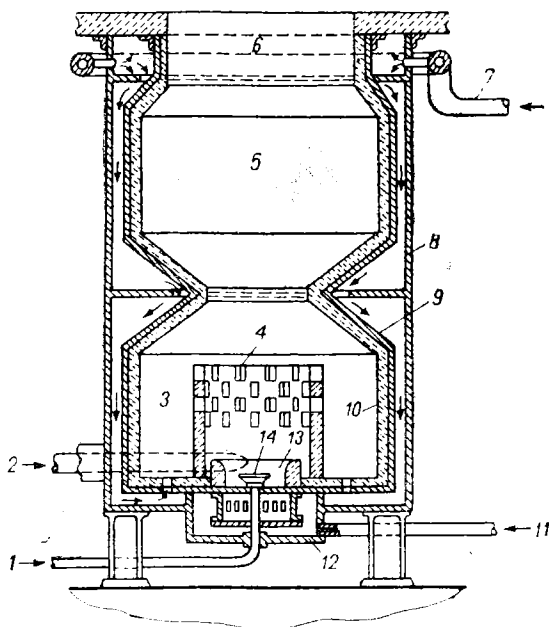


Рис. 68. Топочное устройство для сжигания газов, содержащих окись углерода (тип ПГО-го):

1 — трубопровод для подачи топлива; 2 — трубопровод для подачи ПГО; 3 — керамическая насадка; 4 — отверстие для воздуха; 5 — камера дожига; 6 — отверстие для дымовых газов; 7 — трубопровод для подачи воздуха; 8 — наружная стенка печи; 9 — наружная обшивка камеры сгорания; 10 — камера сгорания; 11 — трубопровод для подачи воздуха; 12 — распределитель; 13 — форкамера; 14 — расширитель.

В газах регенерации порошкообразного катализатора на установках крекинга нефтяного сырья содержится много окиси углерода. Некоторые авторы [135] предлагают направлять эти газы в топочное устройство для сжигания СО с целью использования выделяющегося тепла для производства водяного пара.

На рис. 68 показан вертикальный разрез такого топочного устройства. Оно выполнено в виде цилиндрической камеры сгорания 10 с внутренней керамической насадкой 3, имеющей отверстия 4 для вывода продуктов сгорания дополнительного топлива в пространство между камерой сгорания и керамической насадкой. Газы от регенерации порошкообразного катализатора подаются в кольцевую зону горения по трубопроводу 2. Воздух, необходимый для сгорания

топлива, поступающего по трубопроводу 1 и проходящего через расширитель 14 и форкамеру 13, подается по трубопроводу 11 через распределитель 12. Воздух, необходимый для сжигания газов, подается по трубопроводу 7 через отверстия в нижней части топочного устройства. Продукты сгорания окиси углерода и ПГО, проходя камеру дожигания 5, через отверстие 6 поступают в утилизатор тепла.

Процесс сжигания — один из самых древних методов борьбы с примесями, обладающими дурным запахом. В большинстве случаев применяется полное сжигание; частичное сжигание может послужить причиной появления еще более сильного запаха, чем первоначальный. Типичным примером может служить бутиловый спирт, обладающий слабым запахом. При окислении его до масляного альдегида,

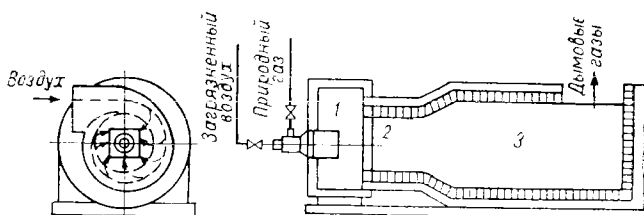


Рис. 69. Печь для сжигания вентиляционных выбросов и технологических газов, содержащих вещества с резким запахом (тип ПГО-Г):

1 — форкамера; 2 — зона смешения; 3 — зона сгорания.

а затем до масляной кислоты, наблюдается усиление запаха. Лишь полное разрушение до воды и углекислого газа снимает запах.

Обычная конструкция установки для сжигания таких газов [136] показана на рис. 69.

Печь подобной конструкции была использована в г. Грималь (США) для дезодорации газов со станции перекачки сточных вод [137]. Печь использует около  $6 \text{ м}^3/\text{сутки}$  природного газа с четырехкратным избытком воздуха. С целью более полного удаления пахнущего воздуха из помещений станции, последние связаны трубой с печью и приспособлениями, поддерживающими в помещениях небольшой вакуум. Печь работает без присмотра в течение 6 месяцев. На случай возникновения пожара печь снабжена звуковым сигналом и контрольными приборами.

Для обезвреживания отходящих газов в производстве эмалирования проводов на кабельных заводах от летучих с резким и неприятным запахом веществ лаборатория газовой теплотехники Куйбышевского политехнического института имени Куйбышева предложила проводить выжигание токсичных компонентов на установке, размещаемой в вентиляционной шахте печи [138]. На рис. 70 изображена принципиальная схема вентиляционной шахты печи со встроенной установкой дожигания отходящих газов.

Установка работает следующим образом. Провода, покрытые предварительно лаком, проходят через боковые вертикальные камеры 4, где высушиваются за счет тепла, получаемого от электронагревателей. ПГО, образующиеся в процессе сушки, сильно разбавляются воздухом, подсасываемым из цеха через щели 2, и поступают через верхние боковые проходы 1 в вентиляционную шахту 3 в зону действия горелок 5. Необходимым условием выжигания вредных компонентов является полное перекрытие сечения шахты пламенем.

Процесс сгорания полностью заканчивается в пределах вентиляционной шахты, представляющей собой своеобразную топку. Продукты полного сгорания выбрасываются в атмосферу.

Большое распространение для уничтожения токсичных веществ в отходящих газах получили установки факельного сжигания. К факельным установкам предъявляются высокие требования в отношении полноты сжигания и обеспечения безопасной и надежной работы в условиях пожаро- и взрывоопасных химических производств. Эти требования достигаются:

1) конструкцией устройства для сжигания, обеспечивающей устойчивый режим факела при широких пределах изменения количества и состава сжигаемого газа;

2) строгим соблюдением основных правил безопасной эксплуатации.

В зависимости от высоты установки факельной горелки различают низкие факелы, высотой приблизительно  $4 \div 25$  м, и высокие факелы, которые достигают в отдельных случаях высоты свыше 100 м.

Определение минимального расстояния факела до промышленных сооружений и расчет факельных горелок подробно рассматриваются в работах Е. Е. Людвиг и И. Д. Хайека [139], а условия безопасной эксплуатации факельных установок в работах А. С. Лапидуса [140, 141]. Конструкции факельных горелок довольно многочисленны и разнообразны.

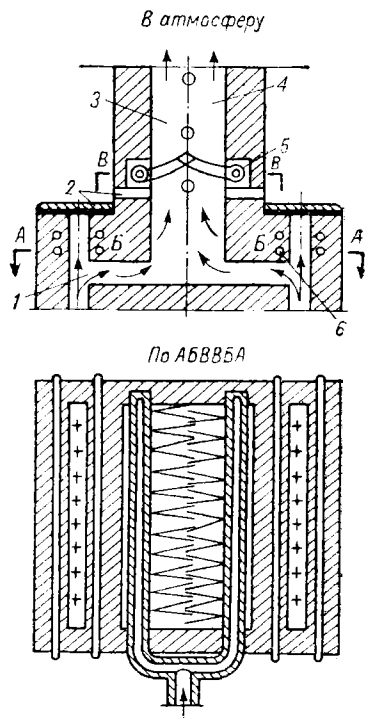


Рис. 70. Схема установки для дожигания токсичных компонентов в отходящих газах эмульсепечей (тип ПГО-го):

1 — боковой проход; 2 — щели; 3 — вентиляционная шахта; 4 — камера; 5 — горелка; 6 — отверстие для проводов.

Для сжигания ПГО-г с установок по производству битумов и красителей (петролатума) Всесоюзным научно-исследовательским институтом по технике безопасности в нефтяной промышленности (ВНИИТБ) была изготовлена и испытана форсунка [142], общий вид которой изображен на рис. 71.

Фирмой «Fulmina» (ФРГ) [143] разработана факельная горелка с паровыми дюзами, предназначенная для сжигания горючих газов (пропана, ацетилена, метана, этана, водорода и др.) без дыма и сажеобразования. Подобные конструкции применяются для сжигания промышленных газов и других производств [144]. На рис. 72 показан один из вариантов такой факельной горелки.

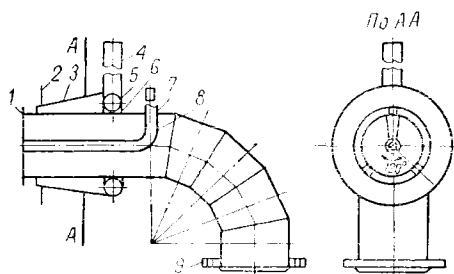


Рис. 71. Общий вид форсунки ВНИИТБ для сжигания ПГО-г производств получения битумов:

1 — газовая заслонка; 2 — воздушная заслонка; 3 — кожух; 4 — штуцер для подвода газа; 5 — кольцевая горелка; 6 — доньшко; 7 — воздуховод для ПГО; 8 — штуцер для подвода сжатого воздуха; 9 — фланец.

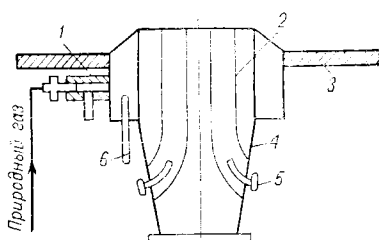


Рис. 72. Конструкция факельной горелки с паровыми дюзами для сжигания газообразных отходов (тип ПГО-го):

1 — дежурная горелка; 2 — воздушная труба; 3 — защитный козырек; 4 — корпус факельной горелки; 5 — паровая дюза; 6 — карман для термомары.

Для сжигания фтор-, бром-, хлор- и йодсодержащих газов совместно с горючими газами, такими как пропан, бутан, в атмосфере инертного газа (например, азота) предложена [145] горелка, принципиальная схема которой представлена на рис. 73.

При сжигании газов образуются галогеноводородные кислоты, которые улавливаются в абсорбционных аппаратах. При диаметре отверстия 2, равном 1 мм, производительность горелки составляет от 0,4 до 4 кг/ч фторсодержащих газов. Давление используемого инертного газа 900 мм рт. ст.

Для сжигания ПГО может быть использована конструкция устройства, предложенная Г. Шюель [146]. На рис. 74 изображено предложенное устройство.

ПГО подводится в камеру 2 по кольцевому каналу 6 клапана 5. На штоке клапана с одной стороны имеется углубление 7 для увеличения сопротивления возвратному потоку газов из камеры, а с другой стороны находится винт 4 для регулирования количества ПГО, подаваемого в камеру. Насадка 11 имеет центральное конусное отверстие 9 и несколько кольцевых каналов 8. На конце насадки расположено смешивающее сопло 10.

Рис. 73. Конструкция горелки для сжигания галогенсодержащих газов в атмосфере инертного газа (тип ПГО-гм):

1 — внутренний корпус горелки; 2 — отверстие для выхода ПГО; 3 — внешний корпус горелки; 4 — отверстия для выхода инертного газа; 5 — канал для смеси инертного газа и ПГО; 6 — штуцер для подачи инертного газа; 7 — игла; 8 — штуцер для природного газа; 9 — кольцевое пространство для природного газа; 10 — штуцер для инертного газа; 11 — кольцевое пространство для инертного газа.

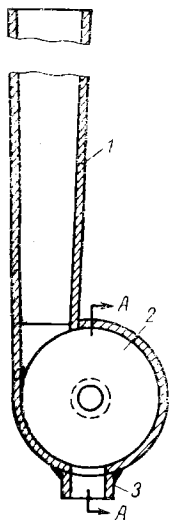
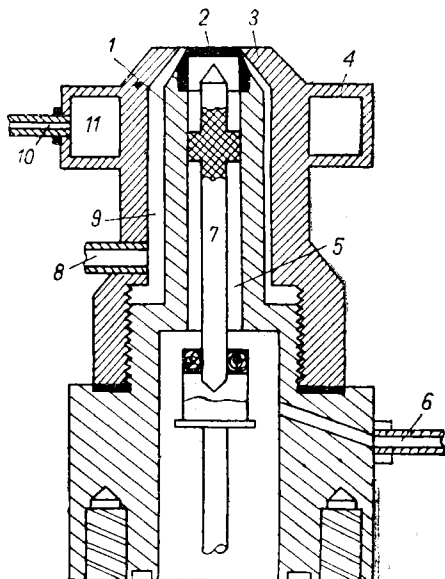
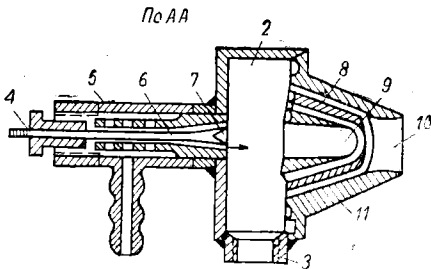


Рис. 74. Устройство для пульсирующего сжигания высококалорийных газообразных продуктов:

1 — пульсирующая трубка; 2 — камера; 3 — штуцер для крепления запальных свечей; 4 — винт; 5 — клапан; 6 — кольцевой канал; 7 — углубление; 8 — кольцевые каналы; 9 — конусное отверстие; 10 — смешивающее сопло; 11 — насадка.



После сжигания порции ПГО в камере сгорания одной трубы большая часть дымовых газов по этой трубе выходит наружу, а оставшаяся часть дымовых газов через насадку поступает снова в камеру сгорания, куда одновременно со струей дымовых газов через смешивающее сопло засасываются газы, содержащие токсичные вещества.

На рис. 75 представлена схема факельной установки, работающей под избыточным давлением 1,5 ат.

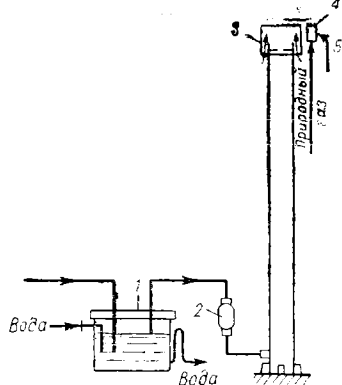


Рис. 75. Схема факельной установки сжигания газообразных отходов (тип ПГО-го):

1 — гидрозатвор; 2 — огнепреградитель; 3 — горелка (основная); 4 — дежурная горелка; 5 — система зажигания дежурной горелки.

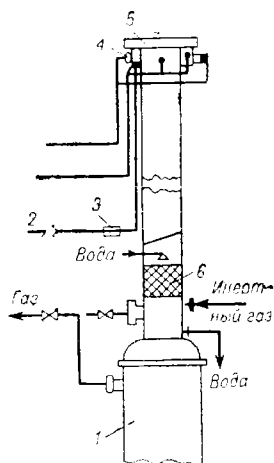


Рис. 76. Схема установки факельного сжигания газообразных отходов (тип ПГО-го):

1 — реактор; 2 — инжекционный смеситель; 3 — электроаналитическое устройство; 4 — дежурная горелка; 5 — горелка (основная); 6 — насадка-огнепреградитель.

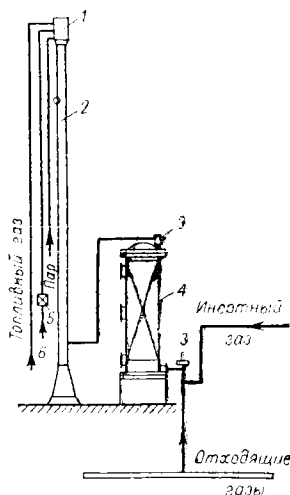


Рис. 77. Схема установки факельного сжигания газов, содержащих ацетилен (тип ПГО-го):

1 — факельная горелка; 2 — труба; 3 — торцевая разрывная мембрана; 4 — огнепреградитель; 5 — инжекционный смеситель с электроаналитическим устройством; 6 — система зажигания дежурной горелки.

ПГО поступают через гидрозатвор 1, препятствующий возможному проскоку воздуха из атмосферы в систему, и огнепреградитель 2 в факел, на конце которого установлена горелка 3. Для поджигания основной горелки предусматривается установка дежурной горелки 4, работающей на природном газе. Поджигание дежурной горелки осуществляется с помощью системы зажигания 5.

На рис. 76 показана схема установки факельного сжигания, смонтированной непосредственно на технологическом аппарате. Производительность установки более 10 000  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

На рис. 77 приведена схема установки факельного сжигания ацетилена. Сбрасываемый ацетилен поступает на горелку с паровыми

дюзами. Поскольку сжигание ацетилена за счет подсоса воздуха идет с сильным выделением сажи, предусматривается подача пара через сопла, что обеспечивает раздробление пламени и вдувание в ядро его воздуха и пара.

Применение той или иной схемы факельного сжигания оценивается составом продуктов, находящихся в ПГО, и требованиями, предъявляемыми к полноте их сжигания. Некоторые сравнительные данные по экономической целесообразности разных факельных установок сжигания [147—149] приведены в табл. 15.

Таблица 15

Сравнение капитальных затрат (в %) на установки факельного сжигания

Тип и высота факельной установки	Собственно факельное устройство	Вспомогательное хозяйство	Общая стоимость
При $H > 25$ м без пара	45	2	47
При $H > 25$ м с паром	45	155	200
При $H < 25$ м с водой	70	30	100

### Каталитическое сжигание ПГО

В промышленности все шире используется каталитическое сжигание токсичных органических веществ, находящихся в ПГО.

Если содержание горючих органических продуктов, находящихся в отходящих газах, мало и не выгодно использовать для их обезвреживания метод прямого сжигания, то обычно используют метод каталитического сжигания. В этом случае процесс протекает при 200—300° С, что значительно меньше температуры, потребной для полного обезвреживания при прямом сжигании в печах и равной 950—1100° С.

Самыми первыми начали и сейчас активно ведут работы в этом направлении две немецкие фирмы — Degussa GmbH во Франкфурте и Benno Schilde Maschinenbau AG из Бадхерсфельда [150]. Многолетние исследования в лаборатории фирмы Degussa показали, что щелочные металлы и их соединения, нанесенные на различные носители (например, окислы металлов) часто оказываются более эффективными и надежными, а также гораздо дешевле, чем катализаторы из благородных металлов. На таких катализаторах реакция окисления начинается при невысоких температурах (порядка 200° С),

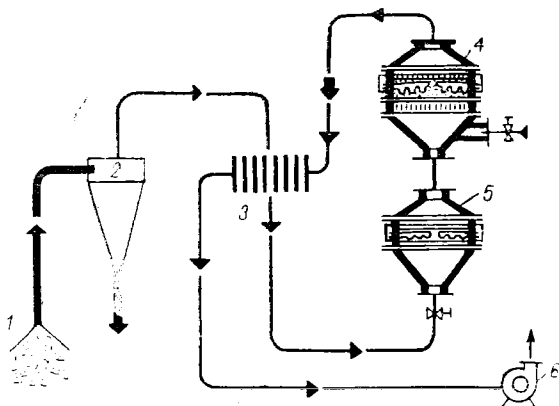


Рис. 78. Схема установки каталитического сжигания ПГО по методу Дегусса — Шильде (тип ПГО-го):

1 — трубопровод; 2 — сепаратор; 3 — теплообменник; 4 и 5 — контактные аппараты; 6 — вентилятор.

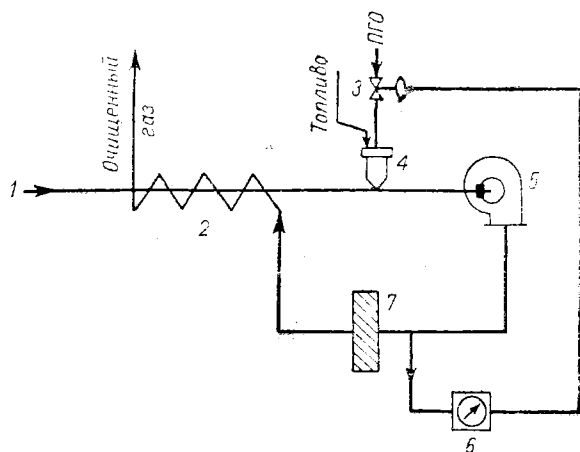


Рис. 79. Схема установки каталитического сжигания ПГО (тип ПГО-го):

1 — рабочий аппарат; 2 — теплообменник; 3 — регулирующий клапан; 4 — форсунка для подогрева газа; 5 — вентилятор; 6 — прибор для контроля за температурой; 7 — контактный аппарат.

что значительно повышает возможность их использования для каталитического сжигания ПГО. В качестве носителя катализатора фирмы Degussa и Schilde рекомендуют окись алюминия, кизельгур и силикаты [151].

На рис. 78 показана схема каталитического сжигания ПГО.

ПГО засасываются в систему и по трубопроводу 1 поступают в сепаратор 2, где происходит отделение газов от пыли. Таким образом поверхность катализатора предохраняется от забивки. После очистки ПГО поступают в теплообменник 3, где нагреваются до температуры, при которой происходит каталитическое окисление. Обогрев осуществляется газами, выходящими из контактного аппарата 4. Нагретые до 200—

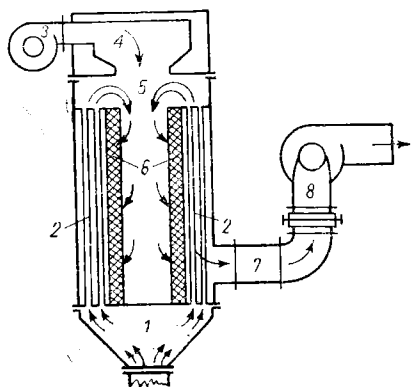


Рис. 80. Схема установки каталитического сжигания ПГО производства лаков (тип ПГО-го):

1 — распределитель; 2 — теплообменник; 3 — вентилятор; 4 — камера сгорания; 5 — камера смешения; 6 — катализатор; 7 — газоход; 8 — регулировочный шабер.

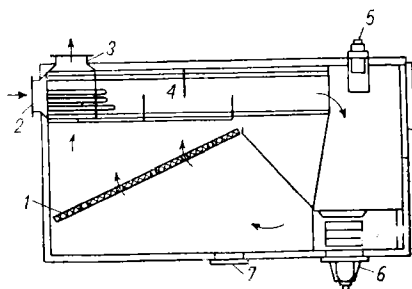


Рис. 81. Схема аппарата для каталитического сжигания ПГО с внутренним теплообменником:

1 — катализатор; 2 — штуцер для ввода ПГО; 3 — штуцер для выхода очищенных газов; 4 — теплообменник; 5 — горелка для предварительного нагревания; 6 — вентилятор; 7 — люк для загрузки катализатора.

300° С ПГО поступают в контактные аппараты 4 и 5. Обезвреженные ПГО проходят через теплообменник и с помощью вентилятора 6 выбрасываются в атмосферу.

Подобная схема обезвреживания рекомендуется для каталитического сжигания ПГО, образующихся в производстве вискозы и содержащих в небольших количествах сероводород и сероуглерод [152]. Такую схему можно применять в производствах синтетического волокна и прядильных производствах [153], а также в производстве минеральных удобрений [125, 154, 155].

Для обезвреживания ПГО, содержащих пары бензина, бензола, фталатов, крезолов нашла применение установка [160], схема которой приведена на рис. 79.

Аналогичные схемы каталитического сжигания ПГО нашли применение в процессах сушки свежескрашенных изделий [156] и в производстве электродов [157].

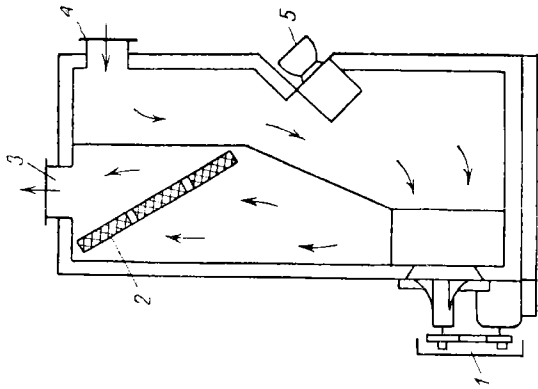


Рис. 82. Схема аппарата для каталитического сжигания ПГО (тип ПГО-го):

1 — вентилятор; 2 — катализатор; 3 — штуцер для выхода очищенного газа; 4 — штуцер для ввода ПГО; 5 — горелка для предварительного нагревания;

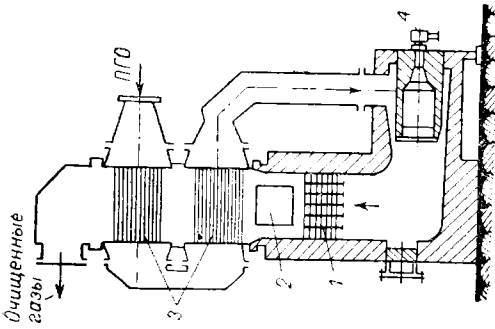


Рис. 83. Схема аппарата для каталитической очистки газообразных отходов (тип ПГО-го):

1 — катализатор; 2 — блок для загрузки катализатора; 3 — теплообменник; 4 — камера сгорания.

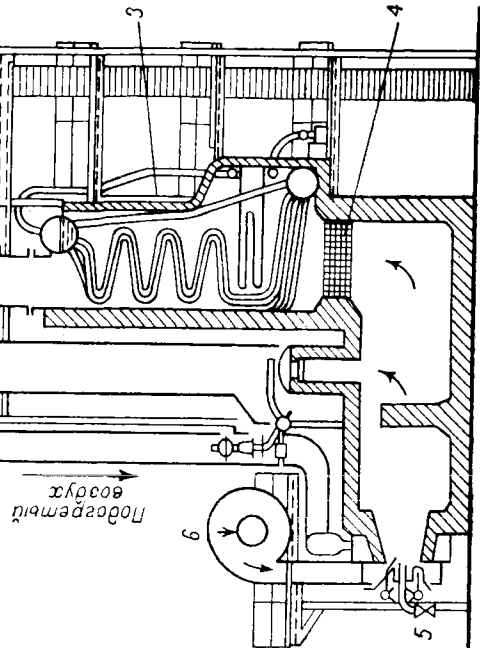


Рис. 84. Схема установки для каталитической очистки ПГО с использованием тепла (тип ПГО-го):

1 — теплообменник; 2 — вентилятор; 3 — воздухоподогреватель; 4 — катализатор; 5 — вентилятор на линии подачи топлива; 6 — вентилятор для подачи ПГО.

В настоящее время наблюдается тенденция в совершенствовании и унифицировании основного аппарата каталитического сжигания.

Для обезвреживания ПГО производства лаков предложена установка, в которой контактный аппарат выполнен с цельнометаллическим катализатором в виде цилиндра [158]. Схема такой установки приведена на рис. 80.

Установка рассчитана на производительность от 1500 до 2000  $\text{лм}^3/\text{ч}$ . Подлежащие очистке ПГО поступают снизу через распределитель 1 в трубное пространство теплообменника 2, где нагреваются до температуры реакции за счет тепла очищенных газов. Если этого тепла недостаточно, последние могут дополнительно нагреваться в камере сгорания 4, куда подается вентилятором 3 часть горючих газов после очистки. Нагретые газы через камеру смешения 5, катализатор 6 поступают в газопровод 7. Производительность можно менять за счет регулировочного шибера 8.

Конструкции контактных аппаратов [159, 161], в настоящее время применяемых для каталитической очистки ПГО, приведены на рис. 81—84.

Глава 4

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ  
РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**

Высокие требования к очистке сточных вод и отходящих газов от вредных веществ требуют более совершенных методов обезвреживания, дорогого и сложного оборудования. В связи с этим важное значение имеет стоимость систем обезвреживания.

Отсутствие технико-экономических исследований эффективности применяемых методов обезвреживания не позволяет дать пра-

Таблица 16

**Стоимость действующих промышленных установок  
для обезвреживания отходов**

Тип установки обезвреживания отходов	Производительность, т/ч	Стоимость, тыс. рублей		Литература
		полная	на 1 т твердого вещества/ч	
Камерная печь с колосниковой решеткой (твердые отходы)	6	860	3,9	[9]
	20	1750	2,4	[6]
Многоподовая печь (осадки сточных вод)	0,3	610	2,9	[173]
	0,5	—	6	[22]
Барабанная печь (осадки сточных вод)	2	2500	—	[174]
Сушка осадка в распылительной печи	0,5	—	5	[40]
Печь с псевдоожиженным слоем (для обезвреживания сульфатных шелоков)	—	—	2,5	[68]
Открытое сжигание сточных вод	0,1	—	20	[70]
Камерная печь (для сточных вод)	170	3175 *	18,65 *	[108]
Мокрое сжигание (для сточных вод)	70	2340 *	33,4 *	[175]

\* 100 шведских крон = 17,36 руб.

вильную оценку экономической целесообразности применения того или иного метода. Однако мы сочли необходимым привести действительные затраты на осуществление различных методов обезвреживания для конкретных видов отходов с целью ориентировочной оценки самого процесса термического обезвреживания. В табл. 16 приведены данные по стоимости промышленных установок обезвреживания промышленных отходов.

Таблица 17

Уничтожение осадков сточных вод в Англии

Тип уничтожения и обработки осадка сточных вод	Сухое вещество, т/день	Диапазон наивысших цен за 1 т сухого вещества, руб.	Доход на 1 т сухого вещества, руб.	Общая стоимость за 1 т сухого вещества, руб.	Примечания
Распределение на полях или захоронение в подходящем месте . . . . .	Около 1000	3,8—10,3	~ 2,2	6,5	Зависит от вида перевозок и транспорта, расстояния, топографии; данные очень памятчивы
Полусухие и тарированные для удобрений	950	8,6—37,9	4,3—19,5	10,3	—
Полусухие с использованием вакуум-фильтров	100	32,5—59,5	4,3—19,5	33,5	Стоимость довольно постоянна, но количества сомнительны
Сброс в море (вывоз на баржах) . . . . .	450	8,65—32,5	—	19,5	Стоимость повышается при замене тары
Лагунирование . . . . .	60	1,1—5,4	—	—	Местные условия
Обработка осадка для получения жировых веществ . . . . .	80	16,2—32,5	11,9	7,6	С повышением количества шерстомойных предприятий растет
Прямой сброс в море	900	1,6—3,2	—	2,2	Опасны для здоровья
Уничтожение захоронением или смешанными способами . . . . .	25	2,2—10,8	—	6,5	

Примечание. 1 фунт стерлингов = 2,1647 руб. (курс на 1/III 1968 г.).

В табл. 17 приведены данные по стоимости уничтожения осадков промышленных сточных вод различными методами в Англии [33].



$$V = V_{\text{в}} + V_{\text{ж}} = V_{\text{в}} + \frac{W_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{ж}}} \quad (7)$$

где  $V$ ,  $V_{\text{ж}}$  — объемы системы и жидкости,  $\text{м}^3$ ;  
 $\gamma_{\text{ж}}$  — удельный вес жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$s = \frac{q_{\text{в}}'' - q_{\text{в}}^{\text{п}}}{q_{\text{в}}''} \quad (8)$$

где  $q_{\text{в}}''$  — общее количество воздуха в аппарате,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  
 $q_{\text{в}}^{\text{п}}$  — количество растворенного воздуха,  $\text{кг}/\text{ч}$ .

$$T_{\text{пр}} = \frac{T}{T_{\text{кр}}} \quad (9)$$

где  $T_{\text{пр}}$ ,  $T_{\text{кр}}$  — температуры приведенная и критическая,  $^{\circ}\text{К}$ .

$$P_{\text{пр}} = \frac{P}{P_{\text{кр}}} \quad (10)$$

где  $P_{\text{пр}}$ ,  $P_{\text{кр}}$  — давления приведенное и критическое,  $\text{кгс}/\text{см}^2$ .

$$z_{\text{см}} = \frac{z_{\text{в}} N_{\text{в}} + z_{\text{п}} N_{\text{п}}}{N} \quad [163] \quad (11)$$

где  $z_{\text{см}}$ ,  $z_{\text{в}}$ ,  $z_{\text{п}}$  — коэффициенты сжимаемости влажного воздуха, сухого воздуха, водяного пара;  
 $N_{\text{в}}$ ,  $N_{\text{п}}$  — мольные доли воздуха и водяного пара.

$$V_{\text{р}} = W_{\text{ж}} \zeta \quad (12)$$

где  $V_{\text{р}}$  — объем растворенного газа,  $\text{м}^3$ ;  
 $\zeta$  — растворимость газа в жидкости,  $\text{см}^3/\text{см}^3$  сточных вод.

$$I = (0,24 + 0,47x) t + 595x \quad (13)$$

где  $I$  — теплосодержание воздуха,  $\text{ккал}/\text{кг}$ ;  
 $t$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{\text{в}} = q_{\text{в}}'' (I_{\text{к}} - I_{\text{п}}) \quad (14)$$

где  $Q_{\text{в}}$  — количество тепла, необходимое для нагревания влажного воздуха от  $t_1$  до  $t_2$ ,  $\text{ккал}/\text{ч}$ ;  
 $I_{\text{в}}$ ,  $I_{\text{к}}$  — теплосодержание влажного воздуха до теплообменника и после,  $\text{ккал}/\text{кг}$  сухого воздуха.

$$Q_{\text{ж}} = W c_{\text{ж}} (t_2 - t_1) \quad (15)$$

где  $Q_{\text{ж}}$  — количество тепла, необходимое для нагревания жидкости от  $t_1$  до  $t_2$ ,  $\text{ккал}/\text{ч}$ ;  
 $c_{\text{ж}}$  — теплоемкость воды,  $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ .

$$Q_{\text{реак}} = 3,05 \text{ ХПК} \quad [120] \quad (16)$$

где  $Q_{\text{реак}}$  — количество тепла, выделяемого в результате химической реакции,  $\text{ккал}/\text{ч}$ ;  
 $\text{ХПК}$  — химическое потребление кислорода,  $\text{г}$  кислорода/ $\text{л}$  сточных вод.

$$\lambda_{\text{ж}} = 1,29 \cdot 10^{-4} c_{\text{р}} \gamma_{\text{ж}} \sqrt[3]{\frac{\gamma_{\text{ж}}}{18}} \quad [162] \quad (17)$$

где  $\lambda_{\text{ж}}$  — теплопроводность жидкости,  $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$ ;  
 $c_{\text{р}}$  — теплоемкость газа,  $\text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{мол} \cdot \text{град})$ .

$$Nu = 0,021 \varepsilon_i Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad [162] \quad (18)$$

где  $Nu$  — критерий Нуссельта;  
 $Re$  — критерий Рейнольдса;  
 $Pr$  — критерий Прандтля.

$$K = \frac{I}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (19)$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи,  $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$ ;  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$ ;  
 $\delta_{ст}$  — толщина стенки,  $м$ .

$$Q = FK \Delta t_{ст} \quad (20)$$

где  $F$  — поверхность теплообмена,  $м^2$ .

$$\varphi_x = 0,833\beta \quad (21)$$

где  $\varphi_x$  — газосодержание смеси;  
 $\beta$  — объемное расходное газосодержание.

$$Nu = 0,3Pr^{0,25}\varphi_x^{0,2} \quad (\text{при } \varphi_x \leq 1 \quad [169]) \quad (22)$$

$$Nu = 0,3Pr^{0,25} \quad (\text{при } \varphi_x > 1 \quad [169]) \quad (23)$$

$$Nu = 21 Kr Pr^{-0,2} + 0,00185W Pr^{0,66} \quad (24)$$

$$\text{где } Kr = \frac{\omega_r (vg)^{1/4}}{\omega_{см}^2};$$

$W = \frac{\omega_{см}}{(vg)^{1/4}} \quad [169]$  (здесь  $\omega_r$  — скорость газового потока, отнесенная к полному сечению аппарата,  $м/сек$ ;  $\omega_{см}$  — скорость газо-жидкостной смеси, отнесенная к полному сечению аппарата,  $м/сек$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $м/сек^2$ ).

$$\alpha_{г-ж-тв} = A \alpha_{г-ж} \quad (25)$$

где  $A = \left( \frac{\rho_{тв}}{\rho_{ж}} \right)^{0,15} (x_A d_{ст})^{0,06} \quad [168]$ .

$$\gamma_r = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273P}{TP_0} \quad (26)$$

где  $\gamma_r$  — удельный вес газа,  $кг/м^3$ .

$$\mu_{г_2} = \mu_{г_1} \left( \frac{T_1 + C}{T_2 + C} \right) \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{0,7} \quad (27)$$

(для кислорода  $C = 131$ ; для воздуха  $C = 124 \quad [162]$ )

$$\rho_{в. \text{возд}} = \frac{p_{с. \text{ух}}(P - 0,378 p_{H_2O})}{P} \quad [167] \quad (28)$$

$$\beta = \frac{V_n}{V} \quad (29)$$

$$\lambda = 4880 \mu_n c_p q \quad [162] \quad (30)$$

$$Nu = 0,21 Re^{0,65} \quad [162] \quad (31)$$

$$c'_p = 6,935 - 0,000677t - 0,1310 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (32)$$

(для  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$  от 0 до  $2200^\circ C$  [163])

$$c'_p = 8,361 + 0,000833t + 0,1310 \cdot 10^{-5}t^2 \quad (33)$$

(для  $H_2O$  от 0 до  $2200^\circ C$  [163])

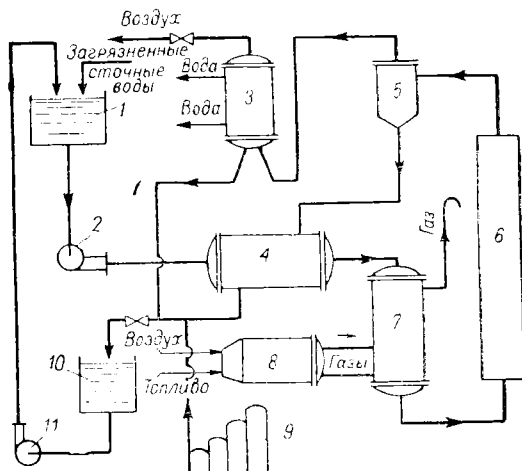
**Расчет установки по обезвреживанию сточных вод методом «мокрого сжигания» (практический пример)**

Спроектировать установку по обезвреживанию сточных вод полимерных материалов по следующим исходным данным:

Производительность . . . . .	120 м <sup>3</sup> /сутки
Количество органических веществ в сточных водах:	
I . . . . .	1 г/л
II . . . . .	10 г/л
III . . . . .	100 г/л
Условия процесса:	
давление . . . . .	250 кгс/см <sup>2</sup>
температура . . . . .	340° C
время контакта . . . . .	2 ч
Сточная вода содержит органическое вещество $C_{10}H_{40}N_{10}$	

- Определить: 1) объем реакторов, емкостей;  
2) количество тепла, необходимое для нагревания стока;  
3) поверхность теплообменников.

Описание схемы установки. Процесс обезвреживания сточных вод осуществляется по схеме, представленной на рис. 85. Сточная вода



**Рис. 85. Технологическая схема установки для обезвреживания ПСВ-г методом «мокрого сжигания»:**

1 и 10 — емкости; 2 и 11 — насосы; 3 — конденсатор;  
4 и 7 — теплообменники; 5 — сепаратор; 6 — реактор;  
8 — печь; 9 — компрессор.

собирается в емкости 1. После определения среднего количества органических продуктов сточную воду насосом 2 под давлением 250 кгс/см<sup>2</sup> подают в теплообменник 4. Воздух в количестве, необходимом для процесса обезвреживания, компрессором 9 под давлением 250 кгс/см<sup>2</sup> смешивается с обрабатываемой сточной водой и подается в теплообменник 4. В нем газо-жидкостная смесь нагревается от 20 до 250° С с помощью тепла, отдаваемого обезвреженными сточными водами. В теплообменнике 7 газо-жидкостная смесь нагревается до 320—340° С дымовыми газами, образуемыми путем сжигания топлива в печи 8 и поступает в реактор 6.

Нагретая до 320—340° С газо-жидкостная смесь поступает в сепаратор 5, где происходит отделение газа от жидкости. Жидкость с температурой 300—320° С из сепаратора 5 поступает в теплообменник 4 для нагревания исходной сточной воды.

Влажный газ охлаждается в конденсаторе 3 до 50—60° С и выбрасывается в атмосферу, а сконденсированная жидкость смешивается с основной массой и собирается в емкости 10. После анализа сточной воды на содержание вредных продуктов последняя подается либо в канализацию, либо снова в приемную емкость 1.

Данные для расчета:

Производительность  $W_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$

Начальное содержание органических веществ:

$$c_1 = 1 \text{ г/л}$$

$$c_2 = 10 \text{ г/л}$$

$$c_3 = 100 \text{ г/л}^*$$

Начальная температура сточных вод  $t_n = 20^\circ \text{С}$

Давление водяных паров при  $t_n$   $p_{\text{H}_2\text{O}}^n = 0,024 \text{ кгс/см}^2$

Температура сточных вод после теплообменника 4  $t_t = 250^\circ \text{С}$

Давление водяных паров при  $t_t = 250^\circ \text{С}$   $p_{\text{H}_2\text{O}}^t = 40,56 \text{ кгс/см}^2$

Температура стока после теплообменника 7  $t_k = 340^\circ \text{С}$

Давление водяных паров при  $t_k = 340^\circ \text{С}$   $p_{\text{H}_2\text{O}}^k = 148,96 \text{ кгс/см}^2$

Теплоемкость воды  $c_{ж} = 1 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{град)}$ .

### Расчет объема реактора

1. Количество органических веществ в сточной воде:

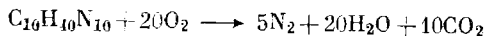
$$q_1^g = 5000 \cdot 1 = 5000 \text{ г/ч или } 5 \text{ кг/ч}$$

$$q_2^g = 5000 \cdot 10 = 50000 \text{ г/ч или } 50 \text{ кг/ч}$$

$$q_3^g = 5000 \cdot 100 = 500000 \text{ г/ч или } 500 \text{ кг/ч}$$

где  $q_1^g$ ,  $q_2^g$  и  $q_3^g$  — весовые количества органических веществ в сточной воде при различных концентрациях, кг/ч.

2. Количество кислорода, необходимого для полного окисления органических продуктов:



$$250 \dots \dots \dots 640$$

$$5,000 \dots \dots \dots q_1$$

$$q_1 = 128 \text{ кг кислорода/ч}$$

$$q_2 = 128 \text{ кг кислорода/ч}$$

$$q_3 = 1280 \text{ кг кислорода/ч}$$

\* Концентрация  $c_1$ — $c_3$  в дальнейшем при различных расчетных характеристиках будут стоять цифрами 1—3 внизу справа.

Принимая двухкратный избыток кислорода от необходимого на окисление, получим:

$$\begin{aligned} q'_1 &= 25,6 \text{ кг кислорода/ч} \\ q'_2 &= 256 \text{ кг кислорода/ч} \\ q'_3 &= 2560 \text{ кг кислорода/ч} \end{aligned}$$

3. Количество воздуха, необходимого для процесса:

$$\begin{aligned} q''_1 &= \frac{q'_1}{0,231} = 110,5 \text{ кг воздуха/ч} \\ q''_2 &= 1105,0 \text{ кг воздуха/ч} \\ q''_3 &= 11050,0 \text{ кг воздуха/ч} \end{aligned}$$

4. Определим влагосодержание воздуха при 20° С и 250 атм по формуле (2):

$$x^{20} = \frac{0,622 \cdot 0,024}{250} = 5,92 \cdot 10^{-5} \text{ кг влаги/кг сухого воздуха}$$

5. Количество влаги, находящейся в воздухе при 20° С и 250 атм, находим по формуле (5):

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= 110,5 \cdot 5,92 \cdot 10^{-5} = 6,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч} \\ \Delta W_2 &= 1105 \cdot 5,92 \cdot 10^{-5} = 65,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч} \\ \Delta W_3 &= 11050 \cdot 5,92 \cdot 10^{-5} = 655 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч} \end{aligned}$$

6. Объем, занимаемый жидкостью при 20° С и 250 атм, определяем по формуле (6):

$$W_{к 1, 2, 3} = 5000 - 6,55 \cdot 10^{-3} \approx 5000 \text{ кг/ч или } 5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

7. Определим объемный расход воздуха при 20° С и 250 атм по формуле (3):

$$\begin{aligned} V'_{в 1} &= \frac{110,5 \cdot 1 \cdot 293 \cdot 29,27}{250 \cdot 10^4} = 0,380 \text{ м}^3/\text{ч} \\ V'_{в 2} &= 3,80 \text{ м}^3/\text{ч} \\ V'_{в 3} &= 38,0 \text{ м}^3/\text{ч} \end{aligned}$$

8. Определим объемный расход смеси при 20° С и 250 атм по формуле (7):

$$\begin{aligned} V_1 &= 5 + 0,380 = 5,380 \text{ м}^3/\text{ч} \\ V_2 &= 5 + 3,80 = 8,80 \text{ м}^3/\text{ч} \\ V_3 &= 5 + 38,0 = 43,0 \text{ м}^3/\text{ч} \end{aligned}$$

9. Определим влагосодержание воздуха при 250° С и 250 атм по формуле (2):

$$x^{250} = \frac{0,622 \cdot 40,56}{250 - 40,56} = 0,1205 \text{ кг влаги/кг сухого воздуха}$$

10. Количество влаги в воздухе при 250° С и 250 атм по формуле (5):

$$\begin{aligned} \Delta W_1^{250} &= 180,5 \cdot 0,1205 = 13,35 \text{ кг/ч} \\ \Delta W_2^{250} &= 1805 \cdot 0,1205 = 133,5 \text{ кг/ч} \\ \Delta W_3^{250} &= 18050 \cdot 0,1205 = 1335 \text{ кг/ч} \end{aligned}$$

11. Объем, занимаемый жидкостью при 250° С, 250 атм,  $\tau = 1$  ч,  $V' = 0,00125 \text{ м}^3/\text{кг}$ , составит:

$$\begin{aligned} W_{к 1}^{250} &= 5000 - 13,35 = 4986,65 \text{ кг или } 6,23 \text{ м}^3 \\ W_{к 2}^{250} &= 5000 - 133,5 = 4866,5 \text{ кг или } 6,08 \text{ м}^3 \\ W_{к 3}^{250} &= 5000 - 1385 = 3665 \text{ кг или } 4,58 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

12. Определим объемный расход воздуха при 250° С и 250 атм по формуле:

$$V_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}} RT}{P_{\text{в}} \cdot 10^4}$$

$$V_{\text{в}1}^{250} = \frac{110,5 \cdot 31,4 \cdot 523}{209,46 \cdot 10^4} = 0,870 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_{\text{в}2}^{250} = 8,70 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_{\text{в}3}^{250} = 87,0 \text{ м}^3/\text{ч}$$

13. Определим объемный расход смеси при 250° С и 250 атм:

$$V_1^{250} = 6,23 + 0,870 = 7,10 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_2^{250} = 6,08 + 8,70 = 14,78 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_3^{250} = 4,58 + 87,0 = 91,58 \text{ м}^3/\text{ч}$$

14. Определим влагосодержание воздуха при 340° С и 250 атм:

$$x^{340} = \frac{0,622 \cdot 148,96}{101,04} = 0,92 \text{ кг влаги/кг воздуха}$$

15. Количество влаги в воздухе при 340° С и 250 атм:

$$\Delta W_1^{340} = 110,5 \cdot 0,92 = 101,5 \text{ кг/ч}$$

$$\Delta W_2^{340} = 1105 \cdot 0,92 = 1015 \text{ кг/ч}$$

$$\Delta W_3^{340} = 11050 \cdot 0,92 = 10150 \text{ кг/ч}$$

Для сточных вод с содержанием органических веществ 100 г/л, очевидно, условия  $P = 250 \text{ атм}$ ,  $t = 340^\circ \text{ С}$  и  $q_3'' = 11050 \text{ кг/кг}$  не могут быть приемлемы из-за полного испарения воды. Максимальная возможная температура процесса для таких сточных вод при данном расходе воздуха и 250 атм лежит в пределах 300—320° С.

16. Объем, занимаемый жидкостью, при  $t = 340^\circ \text{ С}$ ,  $P = 250 \text{ атм}$ ,  $\tau = 1 \text{ ч}$ ,  $V' = 0,00164 \text{ м}^3/\text{кг}$ :

$$W_{\text{в}1}^{340} = 5000 - 101,5 = 4898,5 \text{ кг или } 8,03 \text{ м}^3$$

$$W_{\text{в}2}^{340} = 5000 - 1015 = 3985 \text{ кг или } 6,55 \text{ м}^3$$

17. Объемный расход воздуха при 340° С и 250 атм:

$$V_{\text{в}1}^{340} = \frac{110,5 \cdot 378 \cdot 613}{101,04 \cdot 10^4} = 2,54 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_{\text{в}2}^{340} = 25,40 \text{ м}^3/\text{ч}$$

18. Объемный расход смеси при 340° С и 250 атм:

$$V_1^{340} = V_{\text{в}1}^{340} + V_{\text{ж}1}^{340} = 8,03 + 2,540 = 10,57 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_2^{340} = 6,55 + 25,40 = 31,95 \text{ м}^3/\text{ч}$$

19. Объем реактора, если время контакта равно 2 ч, составит величину:

$$V_{\text{Р}1} = 10,57 \cdot 2 = 21,14 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{Р}2} = 31,95 \cdot 2 = 63,90 \text{ м}^3$$

В случае учета растворимости газов в воде и сжимаемости газов объем реакторов будет меньше.

20. Определим коэффициент растворимости газов в воде.

Ввиду отсутствия данных о растворимости азота при температурах более 100° С примем для 340° С в качестве эталона растворимость азота при 100° С. Как известно, растворимость газов с увеличением температуры более 100° С растет, поэтому действительная растворимость газа будет несколько выше принятой в качестве эталона. При 250 атм и 100° С растворится 2,264 нсм<sup>3</sup> азота в 1 г воды.

Количество азота, растворенного в воде по формуле (12):

$$V_{1N_2}^p = 4\,898\,000 \cdot 2,264 = 11,1 \cdot 10^6 \text{ нсм}^3 \text{ или } 11,1 \text{ нм}^3$$

$$V_{2N_2}^p = 3\,985\,000 \cdot 2,264 = 9,05 \cdot 10^6 \text{ нсм}^3 \text{ или } 9,05 \text{ нм}^3$$

Согласно [171, 172], в воде растворяется 34% кислорода по объему, причем объемное содержание кислорода в воде остается постоянным и не зависит от давления и температуры. Тогда количество растворенного кислорода в сточных водах составит:

$$V_{1O_2}^p = \frac{34,0 \cdot 11,1}{65,9} = 5,75 \text{ нм}^3$$

$$V_{2O_2}^p = \frac{34,0 \cdot 9,05}{65,9} = 4,7 \text{ нм}^3$$

или в пересчете на весовое количество:

$$q_{1N_2} = \frac{11,1}{1,25} = 8,9 \text{ кг}$$

$$q_{2N_2} = \frac{9,05}{1,25} = 7,25 \text{ кг}$$

$$q_{1O_2} = \frac{5,75}{1,429} = 4,03 \text{ кг}$$

$$q_{2O_2} = \frac{4,7}{1,429} = 3,29 \text{ кг}$$

Количество растворенного воздуха составит:

$$q_{1\text{возд}}^p = q_{1N_2} + q_{1O_2} = 8,9 + 4,03 = 13,93 \text{ кг/ч}$$

$$q_{2\text{возд}}^p = q_{2N_2} + q_{2O_2} = 7,25 + 3,29 = 10,54 \text{ кг/ч}$$

Коэффициент растворимости по формуле (8):

$$s_1 = \frac{110,5 - 13,93}{110,5} = 0,875$$

$$s_2 = \frac{110,5 - 10,54}{110,5} = 0,99$$

21. Определим коэффициент сжимаемости воздуха и водяных паров. Согласно формулам (9) и (10), имеем:

$$T_{\text{пр. возд}} = \frac{T}{T_{\text{кр}}} = \frac{273 + 340}{273 + (-140,7)} = 4,64$$

$$P_{\text{пр. возд}} = \frac{P}{P_{\text{кр}}} = \frac{250}{37,2} = 6,73$$

По диаграмме  $z = f(T_{\text{пр}}; P_{\text{пр}})$ , приведенной в работе [163], находим:

$$z_{\text{возд}}^{340} = 1$$

Для водяных паров также находим:

$$T_{\text{пр. вод. пар}} = \frac{273 + 340}{273 + 374} = 0,95$$

$$P_{\text{пр. вод. пар}} = \frac{250}{225} = 1,105$$

$$z_{\text{вод. пар}}^{340} = 0,2$$

Коэффициент сжимаемости влажного воздуха находим по формуле (11).  
Количество воздуха в паро-воздушной смеси:

$$q_{1\text{см}} = 110,5 - 13,93 = 96,57 \text{ кг}$$

$$q_{2\text{см}} = 1105 - 10,54 = 1094,5 \text{ кг}$$

Количество водяных паров в паро-воздушной смеси:

$$q_{W_1} = 96,57 \cdot 0,92 = 89 \text{ кг}$$

$$q_{W_2} = 1094 \cdot 0,92 = 1010 \text{ кг}$$

Количество килограмм-молей воздуха и водяного пара в паро-воздушной смеси:

$$n_{1\text{возд}} = \frac{96,57}{29} = 3,32$$

$$n_{2\text{возд}} = \frac{1094,5}{29} = 37,7$$

$$n_{1\text{вод. пар}} = \frac{89}{18} = 4,95$$

$$n_{2\text{вод. пар}} = \frac{1010}{18} = 56,2$$

Мольные доли воздуха и водяного пара в паро-воздушной смеси:

$$N_{1\text{возд}} = \frac{3,32}{3,32 + 4,95} = 0,4$$

$$N_{1\text{вод. пар}} = \frac{4,95}{3,32 + 4,95} = 0,6$$

$$N_{2\text{возд}} = \frac{37,7}{37,7 + 56,2} = 0,4$$

$$N_{2\text{вод. пар}} = \frac{56,2}{37,7 + 56,2} = 0,6$$

Тогда:

$$z_{\text{см}_1} = 1 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,6 = 0,512$$

$$z_{\text{см}_2} = 0,512$$

22. Уточненный объем реакторов:

$$V_{P_1} = zV'_{P_1}S'_1 = 1 \cdot 21,14 \cdot 0,875 = 18,50 \text{ м}^3$$

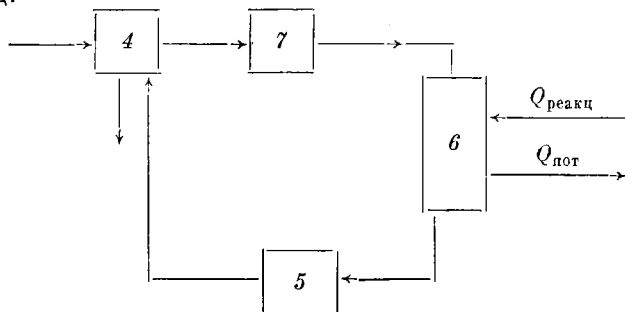
$$V_{P_2} = zV'_{P_2}S'_2 = 1 \cdot 63,90 \cdot 0,99 = 63,3 \text{ м}^3$$

В качестве реактора для процессов, протекающих в газо-жидкостной смеси при высоких давлениях и температурах, принимаем вертикальный цилиндрический аппарат.

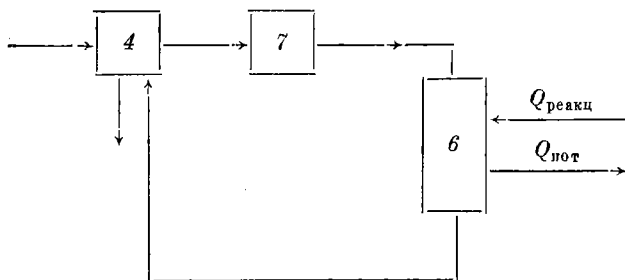
## Тепловой расчет установки

Расчет тепла, необходимого для процесса, определяем по следующим схемам.

А. Схема процесса с использованием тепла жидкой части обезвреженных сточных вод:



Б. Схема процесса с использованием тепла обезвреженных сточных вод:



1. Определим теплосодержание влажного воздуха при  $20^{\circ}\text{C}$  и  $250\text{ атм}$  по формуле (13):

$$I_{\text{в}}^{20} = (0,24 + 0,47 \cdot 5,92 \cdot 10^{-5}) 20 + 595 \cdot 5,92 \cdot 10^{-5} = 0,51 \text{ ккал/кг сухого воздуха}$$

2. Теплосодержание влажного воздуха при  $250^{\circ}\text{C}$  и  $250\text{ атм}$ :

$$I_{\text{в}}^{250} = (0,24 + 0,47 \cdot 0,1205) 250 + 595 \cdot 0,1205 = 146 \text{ ккал/кг сухого воздуха}$$

3. Теплосодержание влажного воздуха при  $340^{\circ}\text{C}$  и  $250\text{ атм}$ :

$$I_{\text{в}}^{340} = (0,24 + 0,47 \cdot 0,92) 340 + 595 \cdot 0,92 = 773 \text{ ккал/кг сухого воздуха}$$

4. Определим по формулам (14) и (15) количество тепла, подведенное к теплообменнику 4 для нагревания сточных вод и влажного воздуха с  $20$  до  $250^{\circ}\text{C}$ :

$$Q_{\text{в}_1}^{250} = 110,5 (146 - 0,51) = 16\ 100 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{\text{в}_2}^{250} = 1105 (146 - 0,51) = 161\ 000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{\text{ж}_1}^{250} = 5000 \cdot 1 (250 - 20) = 1\ 150\ 000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{\text{ж}_2}^{250} = 1\ 150\ 000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{\text{I}}^{250} = 16\ 100 + 1\ 150\ 000 = 1\ 166\ 100 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{\text{II}}^{250} = 161\ 000 + 1\ 150\ 000 = 1\ 311\ 000 \text{ ккал/ч}$$

5. Количество тепла, приносимое необезвреженными сточными водами и влажным воздухом:

$$Q_{в_1}^{20} = 110,5 \cdot 0,51 = 56,3 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_2}^{20} = 1105 \cdot 0,51 = 563 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{ж_1,2} = 5000 \cdot 20 = 100\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_1} = 56,3 + 100\,000 = 100\,056 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_2} = 563 + 100\,000 = 100\,563 \text{ ккал/ч}$$

6. Количество тепла, подводимое в теплообменнике 7 для нагревания сточных вод и влажного воздуха с 250 до 340° С при 250 атм:

$$Q_{в_1}^{340} = 110,5 (773 - 146) = 68\,400 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_2}^{340} = 1105 (773 - 146) = 684\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{ж_1}^{340} = \frac{4986 + 4898}{2} \cdot 1 (340 - 250) = 445\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{ж_2}^{340} = \frac{4966 + 3985}{2} \cdot 1 (340 - 250) = 398\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_1}^{340} = 68\,400 + 445\,000 = 513\,400 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_2}^{340} = 684\,000 + 398\,000 = 1\,082\,000 \text{ ккал/ч}$$

7. Количество тепла, выделяемое в результате реакции окисления, определим по формуле (16):

$$Q_{\text{реакц}} = 3,05 \text{ХПК}$$

Ввиду отсутствия данных по ХПК органического соединения  $C_{10}H_{40}N_{10}$  используем вычисленное значение количества кислорода, необходимого для полного окисления вещества до воды, углекислого газа и азота:

$$Q_{1\text{реакц}} = 5000 \cdot 2,56 \cdot 3,05 \cdot 1,0 = 39\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{2\text{реакц}} = 5000 \cdot 2,56 \cdot 3,05 \cdot 10 = 390\,000 \text{ ккал/ч}$$

8. Количество тепла, теряемое в окружающую среду.

Принимаем, что потери в окружающую среду составляют 10% от количества тепла, сообщенного сточным водам и влажному воздуху:

$$Q_{1\text{пот}} = 0,1 (Q_{в_1}^{250} + Q_{в_1}^{340}) = 167\,950 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{2\text{пот}} = 0,1 (Q_{в_2}^{250} + Q_{в_2}^{340}) = 239\,300 \text{ ккал/ч}$$

В действительности количество теплотерь нужно рассчитывать на поверхность теплоотдающей поверхности с учетом ее изоляции.

9. Количество тепла, уносимое газо-жидкостной смесью из реактора 6:

$$Q_1^p = Q_{в_1} + Q_1^{250} + Q_1^{340} + Q_{1\text{реакц}} - Q_{1\text{пот}} =$$

$$= 100\,056 + 1\,166\,100 + 513\,400 + 39\,000 - 167\,950 = 1\,650\,606 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_2^p = Q_{в_2} + Q_2^{250} + Q_2^{340} + Q_{2\text{реакц}} - Q_{2\text{пот}} =$$

$$= 100\,563 + 1\,311\,100 + 1\,082\,000 + 390\,000 - 239\,300 = 2\,644\,263 \text{ ккал/ч}$$

В первом случае температура газо-жидкостной смеси уменьшилась за счет теплотерь на 24° С, а во втором — возросла на 30° С за счет тепла реакции.

10. Определим количество жидкой фазы при  $t = 316^\circ \text{C}$ ,  $P = 250 \text{ атм}$ ,  $V' = 0,001472 \text{ м}^3/\text{кг}$ :

$$x^{316} = \frac{0,622 \cdot 109,4}{140,6} = 0,485$$

$$\Delta W_1^{316} = 110,5 \cdot 0,485 = 53,5 \text{ кг/ч}$$

$$W_{к_1}^{316} = 5000 - 53,5 = 4946,5 \text{ кг/ч или } 7,27 \text{ м}^3/\text{ч}$$

11. Определим количество жидкой фазы при  $t = 370^\circ \text{C}$ ,  $V' = 0,00233 \text{ м}^3/\text{кг}$ :

$$x^{370} = \frac{0,622 \cdot 214,5}{35,5} = 3,76$$

$$\Delta W_2^{370} = 1105 \cdot 3,76 = 4160 \text{ кг/ч или } 9,7 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$W_{к_2}^{370} = 5000 - 4160 = 840 \text{ кг/ч или } 1,96 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Использование тепла обезвреженных сточных вод по схеме А экономически невыгодно из-за большого количества тепла, уносимого влажным газом. Это невыгодно также из-за снижения коэффициента теплопередачи, о чем будет идти речь ниже. Поэтому для использования тепла обезвреженных сточных вод применим схему Б.

12. Количество тепла, уносимое обезвреженным стоком, если температура стока равна  $70^\circ \text{C}$ :

$$x^{70} = \frac{0,622 \cdot 0,3177}{249,68} = 0,792 \cdot 10^{-3} \text{ кг влаги/кг воздуха}$$

$$\Delta W_1^{70} = 110,5 \cdot 0,792 \cdot 10^{-3} = 0,0875 \text{ кг/ч}$$

$$\Delta W_2^{70} = 1105 \cdot 0,792 \cdot 10^{-3} = 0,875 \text{ кг/ч}$$

$$W_{к_1}^{70} = 5000 - 0,0875 = 4999,9 \text{ кг/ч}$$

$$W_{к_2}^{70} = 5000 - 0,876 = 4999,1 \text{ кг/ч}$$

$$Q_{з_1}^{70} = 4999 \cdot 1 \cdot 70 = 350\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{з_2}^{70} = 4999 \cdot 1 \cdot 70 = 350\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$I_{в_1}^{70} = (0,24 + 0,47 \cdot 0,792 \cdot 10^{-3}) 70 + 595 \cdot 0,792 \cdot 10^{-3} = 14,47 \text{ ккал/кг сухого воздуха}$$

$$I_{в_2}^{70} = I_{в_1}^{70}$$

$$Q_{в_1}^{70} = 110,5 \cdot 14,47 = 1600 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_{в_2}^{70} = 1105 \cdot 14,47 = 16\,000 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_1^{70} = Q_{з_1}^{70} + Q_{в_1}^{70} = 350\,000 + 1600 = 351\,600 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_2^{70} = Q_{з_2}^{70} + Q_{в_2}^{70} = 350\,000 + 16\,000 = 366\,000 \text{ ккал/ч}$$

13. Количество тепла, отдаваемое обезвреженными сточными водами в теплообменник 4 неочищенной сточной воде:

$$Q_1 = Q_1^p - Q_1^{70} = 1\,650\,000 - 351\,600 = 1\,298\,400 \text{ ккал/ч}$$

$$Q_2 = Q_1^p - Q_2^{70} = 2\,646\,263 - 366\,000 = 2\,280\,263 \text{ ккал/ч}$$

Таким образом, для нагревания сточных вод в теплообменнике 4 до  $250^\circ \text{C}$  тепла обезвреженных сточных вод достаточно как для отходов, содержащих 1 г органических веществ (надо 1 166 100 ккал, имеем 1 298 400 ккал), так и для отходов, содержащих 10 г/л органических веществ (надо 1 311 000, имеем 2 280 263 ккал/ч). Следовательно:

1) для сточных вод, содержащих 1 г/л органических веществ, необходимо подвести тепло в количестве:

$$Q_1 = 1\,266\,100 + 513\,400 - 1\,298\,000 = 381\,500 \text{ ккал/ч}$$

2) для сточных вод, содержащих 10 г/л органических веществ, необходимо подвести тепло в количестве:

$$Q_2 = 1\,311\,000 + 1\,082\,000 - 2\,280\,263 = 112\,737 \text{ ккал/ч}$$

### Гидродинамический расчет установки

В настоящее время тепло-массообмен газо-жидкостных систем (влажный воздух — вода) изучен очень мало. Имеющиеся работы касаются в основном изучения тепло-массообмена газо-жидкостных систем при температуре до 60° С и давлении до 20 атм, при газосодержании порядка 0,1—0,8. Процесс тепло-массообмена в горизонтальных аппаратах при движении в них газо-жидкостных смесей вообще не изучен. Имеющиеся работы по изучению тепло-массообмена газо-жидкостных смесей показали, что наличие газовых пузырей в жидкости приводит к турбулизации жидкостного потока и увеличению коэффициента теплоотдачи. Это дает нам право применить для расчета поверхности теплообмена существующие зависимости для жидкостных потоков. Поскольку расчетный коэффициент теплоотдачи будет ниже действительного мы будем иметь некоторый запас поверхности теплообмена.

1. Определим газосодержание в газо-жидкостной смеси при температурах 20, 250, 316, 340, 370° С по формулам (24) и (29):

$$\beta_1^{20} = \frac{0,380}{5,380} = 0,0705; \quad \varphi_{x_1}^{20} = 0,0846$$

$$\beta_2^{20} = \frac{3,8}{8,8} = 0,432; \quad \varphi_{x_2}^{20} = 0,518$$

$$\beta_1^{250} = \frac{0,870}{7,100} = 0,122; \quad \varphi_{x_1}^{250} = 0,147$$

$$\beta_2^{250} = \frac{8,70}{14,780} = 0,59; \quad \varphi_{x_2}^{250} = 0,707$$

$$\beta_1^{340} = \frac{2,54}{10,570} = 0,247; \quad \varphi_{x_1}^{340} = 0,296$$

$$\beta_2^{340} = \frac{25,4}{31,950} = 0,795; \quad \varphi_{x_2}^{340} = 0,95$$

Объем воздуха при 316° С:

$$V_{B_1}^{316} = \frac{110,5 \cdot 35 \cdot 582}{140,6 \cdot 10^4} = 1,625 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Объем воздуха при 370° С:

$$V_{B_2}^{370} = \frac{1105 \cdot 43,2 \cdot 643}{35,5 \cdot 10^4} = 87 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Объем системы:

$$V_1^{316} = 7,27 + 1,62 = 8,89 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$V_2^{370} = 1,96 + 87,00 = 88,960 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$\beta_1^{316} = \frac{1,625}{8,895} = 0,183; \quad \varphi_1^{316} = 0,22$$

$$\beta_2^{370} = \frac{87}{88,89} = 0,977; \quad \varphi_2^{370} \cong 1$$

2. Определим площадь сечения аппаратов при пенном (вертикальное расположение) и при дисперсионном режимах (горизонтальное расположение аппарата).

Согласно работе [168], граница перехода от пузырькового режима к пенному определяется скоростью газа, отнесенной к полному сечению аппарата,  $\omega_r$  равной 0,4 м/сек. Кольцевой или дисперсионный режим наступает для смесей  $\Phi_x = 0,35 \div 0,90$  при  $\omega_r = 4-7$  м/сек, а для смесей  $\Phi_x \leq 0,3$  при скорости  $\omega_r > 10$  м/сек. Принимаем, что теплообменники 4 и 7 расположены горизонтально, а реактор 6 вертикально.

Тогда

$$\begin{aligned}
 f_1^{20} &= \frac{V_{P_1}^{20}}{3600} = \frac{3,380}{3600 \cdot 10} = 1,055 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; & d_1^{20} &= 0,36 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_2^{20} &= \frac{V_{P_2}^{20}}{3600} = \frac{3,8}{3600 \cdot 6} = 1,740 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_2^{20} &= 1,48 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_1^{250} &= \frac{0,870}{3600 \cdot 10} = 0,241 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_1^{250} &= 0,552 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_2^{250} &= \frac{8,7}{3600 \cdot 5} = 4,82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_2^{250} &= 2,47 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_1^{340} &= \frac{2,54}{3600 \cdot 10} = 0,705 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_1^{340} &= 0,95 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_2^{340} &= \frac{25,4}{3600 \cdot 4} = 17,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_2^{340} &= 4,17 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_1^{316} &= \frac{1,625}{3600 \cdot 10} = 0,452 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_1^{316} &= 0,755 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_2^{370} &= \frac{87}{3600 \cdot 4} = 60,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_2^{370} &= 8,75 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_{P_1}^{340} &= \frac{2,54}{3600 \cdot 0,4} = 0,176 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_{P_1}^{340} &= 0,472 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\
 f_{P_2}^{340} &= \frac{25,4}{3600 \cdot 0,4} = 17,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; & d_{P_2}^{340} &= 14,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}
 \end{aligned}$$

Таким образом, для реактора 6 наилучшим диаметром, с точки зрения тепло-массообмена для сточных вод с содержанием 1 г/л органических продуктов является диаметр 4,7 мм, для сточных вод с содержанием 10 г/л органических веществ диаметр 149 мм.

3. Определим скорость движения жидкости при найденных проходных сечениях:

$$\begin{aligned}
 \omega_{ж_1}^{20} &= \frac{50}{3600 \cdot 0,1055 \cdot 10^{-4}} = 131,2 \text{ м/сек} \\
 \omega_{ж_2}^{20} &= \frac{5,0}{3600 \cdot 1,74 \cdot 10^{-4}} = 8 \text{ м/сек} \\
 \omega_{ж_1}^{250} &= \frac{6,230}{3600 \cdot 0,241 \cdot 10^{-4}} = 57,7 \text{ м/сек} \\
 \omega_{ж_2}^{250} &= \frac{6,080}{3600 \cdot 4,82 \cdot 10^{-4}} = 3,5 \text{ м/сек} \\
 \omega_{ж_1}^{340} &= \frac{8,030}{3600 \cdot 0,705 \cdot 10^{-4}} = 31,7 \text{ м/сек} \\
 \omega_{ж_2}^{340} &= \frac{6,550}{3600 \cdot 17,6 \cdot 10^{-4}} = 1,030 \text{ м/сек}
 \end{aligned}$$

4. Определим приближенно гидравлическое сопротивление системы:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ск. ж}} + \Delta P_{\text{ск. г}} + \Delta P_{\text{тр. ж}} + \Delta P_{\text{тр. г}} + \Delta P_{\text{м. с. ж}} + \Delta P_{\text{м. с. г}} + \Delta P_{\text{под. ж}}$$

Предположим, что:

$$\Delta P_{\text{ск. ж}_1}^{20} = \frac{\gamma_{\text{ж}} \omega_{\text{ж}_1}^2}{2g} = \frac{1000 \cdot 131,2^2}{2 \cdot 9,81} = 0,875 \cdot 10^6 \text{ кгс/м}^2 = 87,5 \text{ кгс/см}^2$$

$$\Delta P_{\text{ск. ж}_2}^{20} = \frac{\gamma_{\text{ж}} \omega_{\text{ж}_2}^2}{2g} = \frac{1010 \cdot 64}{19,62} = 0,326 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 \text{ или } 0,326 \text{ кгс/см}^2$$

$$\Delta P_{\text{ск. г}_1}^{20} = \frac{\gamma_{\text{г}} \omega_{\text{г}_1}^2}{2g} = \frac{1,20 \cdot 10^2}{19,62} = 6,56 \text{ кгс/м}^2$$

$$\Delta P_{\text{ск. г}_2}^{20} = \frac{\gamma_{\text{г}} \omega_{\text{г}_2}^2}{2g} = \frac{1,2 \cdot 6^2}{19,6} = 2,2 \text{ кгс/м}^2$$

Как видно из расчетов, основное гидравлическое сопротивление дает жидкостный поток. Поэтому подбор сечения аппаратов надо вести путем выбора оптимальной скорости жидкостного потока, с тем, чтобы общее сопротивление системы не превышало 4—6 кгс/см<sup>2</sup>. Этому требованию удовлетворяет, очевидно, только режим движения газо-жидкостной смеси с содержанием 10 г/л органических веществ. Если режим течения газо-жидкостной смеси для сточных вод с содержанием 1 г/л органических веществ выбрать с таким расчетом, чтобы гидравлическое сопротивление системы не превышало 4—6 кгс/см<sup>2</sup>, то такой режим течения не будет соответствовать наилучшим условиям тепло-массообмена.

С целью удовлетворения обоим требованиям (наименьшее гидравлическое сопротивление, наибольший коэффициент тепло-массоотдачи) необходимо независимо от содержания органических веществ в сточных водах, если их величина не превышает 10 г/л, иметь газосодержание смеси больше 0,43. Однако выполнение последнего требования ведет к резкому возрастанию реакционного объема аппаратов и, следовательно, увеличению капитальных затрат на создание реакторов. Оптимальное соотношение между указанными факторами может быть определено только после проведения экспериментальных исследований на установках полупромышленного типа.

5. Расчет теплообменника 4.

По схеме А	По схеме Б
20 → 250	20 → 320
70 ← 316	70 ← 370
$\Delta t_1 = 50, \Delta t_2 = 66$	$\Delta t_1 = 50, \Delta t_2 = 50$
$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{66 + 50}{2} = 58^\circ \text{C}$	$\Delta t_{\text{ср}} = 50^\circ \text{C}$

Принимаем диаметр трубы:

$$d_{\text{вн}_1} = 24 \text{ мм}$$

$$f_{\text{вн}_1} = 4,82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$\omega_{\text{г}_1}^{20} = 0,219 \text{ м/сек}$$

$$\omega_{\text{г}_1}^{250} = 0,5 \text{ м/сек}$$

$$\omega_{\text{ж}_1}^{20} = 2,9 \text{ м/сек}$$

$$\omega_{\text{ж}_1}^{250} = 2,9 \text{ м/сек}$$

$$d_{\text{вн}_2} = 24 \text{ мм}$$

$$f_{\text{вн}_2} = 4,82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$\omega_{\text{г}_2}^{20} = 2,19 \text{ м/сек}$$

$$\omega_{\text{г}_2}^{250} = 5 \text{ м/сек}$$

$$\omega_{\text{ж}_2}^{20} = 2,9 \text{ м/сек}$$

$$\omega_{\text{ж}_2}^{250} = 2,56 \text{ м/сек}$$

$$\begin{aligned} \omega_{см_1}^{20} &= \omega_{ж_1} + \omega_{г_1} = 3,12 \text{ м/сек} & \omega_{см_2}^{20} &= 2,19 + 2,9 = 5,1 \text{ м/сек} \\ \omega_{см_1}^{250} &= 2,9 + 0,5 = 3,4 \text{ м/сек} & \omega_{см_2}^{250} &= 5 + 2,56 = 7,56 \text{ м/сек} \\ t_{ср. вв_1} &= \frac{250 + 20}{2} = 135^\circ \text{ C} & t_{ср. вв_2} &= \frac{320 + 20}{2} = 170^\circ \text{ C} \\ t_{ср. пар_1} &= \frac{316 + 70}{2} = 193^\circ \text{ C} & t_{ср. пар_2} &= \frac{370 + 70}{2} = 220^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

Находим значения теплоемкости, вязкости, плотности, теплопроводности жидкости [162, 165]:

$$\begin{aligned} t_{ср} &= 135^\circ \text{ C} & t_{ср} &= 170^\circ \text{ C} \\ P &= 250 \text{ кгс/см}^2 & P &= 250 \text{ кгс/см}^2 \\ c_{р_ж} &= 1,0 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{град)} & c_{р_ж} &= 1,0 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{град)} \\ \lambda_ж &= 0,595 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град)} & \lambda_ж &= 0,585 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град)} \\ \mu_ж &= 0,153 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{сек/м}^2 & \mu_ж &= 0,102 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{сек/м}^2 \\ \gamma_ж &= 1145 \text{ кг/м}^3 & \gamma_ж &= 1135 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Определим  $Pr$  и  $Re$ :

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{3600 c_{р_ж} \mu_g}{\lambda} = & Pr &= \frac{3600 \cdot 1 \cdot 0,102 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81}{0,585} = \\ &= \frac{3600 \cdot 1 \cdot 0,153 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81}{0,595} = 0,91 & &= 0,615 \\ Re &= \frac{\omega_ж d_{тр} \rho_ж}{\mu_ж} = \frac{2,9 \cdot 0,024^2 \cdot 1145}{0,153 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81} = & Re &= \frac{2,7 \cdot 0,024^2 \cdot 1135}{0,102 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81} = 17\,700 \\ &= 12\,700 & & \end{aligned}$$

Так как  $Re > 10\,000$ , применим уравнение вида [162]:

$$Nu = 0,021 \varepsilon_L Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{от}} \right)^{0,25}$$

Ввиду того что разность  $t_ж - t_{от}$  мала, величина  $\frac{Pr}{Pr_{от}}$  будет немного выше единицы. При соотношении длины трубы  $L$  к диаметру трубы  $d_{тр}$  равном 30  $\varepsilon_L = 1,07$ .

Тогда:

$$\begin{aligned} Nu_ж &= 0,021 \cdot 1,07 \cdot 12\,700^{0,8} \cdot 0,91^{0,43} = & Nu_ж &= 0,021 \cdot 1,07 \cdot 17\,700^{0,8} \cdot 0,615^{0,43} = \\ &= 0,0225 \cdot 1900 \cdot 0,96 = 40,7 & &= 0,0225 \cdot 2510 \cdot 0,805 = 45 \\ \frac{\alpha \cdot d_{тр}}{\lambda} &= 40,7 & \alpha &= \frac{45 \cdot 0,585}{0,025} = 1095 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)} \\ \alpha_ж &= \frac{40,7 \cdot 0,595}{0,024} = 1010 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град)} \end{aligned}$$

При  $2300 < Re < 10\,000$  критерий  $Nu$  находим по графику [162].

Если  $Pr > 4$  и  $\varphi_x = 0,023 - 1,75$ , для определения можно пользоваться формулами, предложенными В. Н. Соколовым для случая вертикального расположения труб [формулы (22)–(24)]. Им же предложена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи для трехфазных систем (газ — твердое — жидкость) в вертикальных аппаратах при  $Pr > 4$  и  $\varphi_x = 0,023 - 1,75$  [формула (25)].

В случае равенства сечения для внутреннего и внешнего потоков:

$$\alpha_{ж. вл} \approx \alpha_{ж. нар}$$

Тогда коэффициент теплопередачи:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{2}{\alpha_{ж. вл}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}} = \frac{1}{\frac{1}{1010} + \frac{0,004}{15} + \frac{1}{1010}} = 450$$

(где  $\lambda_{ст} = 15$  ккал/(м·ч·град) для нержавеющей стали)

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{1095} + \frac{0,04}{15} + \frac{1}{1095}} = 482$$

Определим поверхность теплообменника 4:

$$F_1 = \frac{Q_1^{250}}{K_1 \Delta t_{ср1}} = \frac{1\,166\,100}{450 \cdot 58} = 44,6 \text{ м}^2$$

$$F_2 = \frac{Q_2^{250}}{K_2 \Delta t_{ср2}} = \frac{1\,311\,000}{482 \cdot 50} = 54,5 \text{ м}^2$$

6. Расчет теплообменника 7:

$$\begin{array}{ccc} 250 \xrightarrow{\text{Ж}} 340 & & 320 \xrightarrow{\text{Ж}} 340 \\ 600 \xleftarrow{\Gamma} 800 & & 600 \xleftarrow{\Gamma} 800 \end{array}$$

$$\Delta t_1 = 350, \quad \Delta t_2 = 460 \qquad \Delta t_1 = 280, \quad \Delta t_2 = 460$$

$$\Delta t_{ср} = 405^\circ \text{C} \qquad \Delta t_{ср} = 370^\circ \text{C}$$

Нагревание газо-жидкостной смеси в теплообменнике 7 осуществляется путем передачи части тепла сгоревших газов стенке трубопровода и от стенки к газо-жидкостной смеси. Так как температура стенки выше средней температуры стока и выше критической температуры  $374^\circ \text{C}$ , то у стенки часть жидкости переходит в парообразное состояние. Паровые пузырьки, проникая во внутрь потока, конденсируются и повышают теплоемкость последнего. Локальное кипение (кипение недогретых жидкостей) целесообразно применять для высокопроизводительных аппаратов, так как при этом могут быть получены чрезвычайно высокие коэффициенты теплоотдачи и критические тепловые потоки.

Если принять температуру стенки  $t_{ст} = 380^\circ \text{C}$ , то, согласно [164], тепловой поток, проходящий через  $1 \text{ м}^2$  поверхности трубы, составит величину порядка  $2,0 \cdot 10^3$  ккал/ч, при  $t_{ст} = 400^\circ \text{C}$  тепловой поток, проходящий через  $1 \text{ м}^2$  поверхности трубы, составит  $1,2 \cdot 10^3$  ккал/ч.

Принимаем диаметр трубы:

$$\begin{array}{ll} d_{вн1} = 24 \text{ мм} & d_{вн2} = 24 \text{ мм} \\ f_{вн1} = 4,82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 & f_{вн2} = 4,81 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \\ \omega_{\Gamma_1}^{250} = 0,5 \text{ м/сек} & \omega_{\Gamma_2}^{250} = 5 \text{ м/сек} \\ \omega_{\Gamma_1}^{340} = 1,465 \text{ м/сек} & \omega_{\Gamma_2}^{340} = 14,65 \text{ м/сек} \\ \omega_{\text{ж}_1}^{250} = 2,9 \text{ м/сек} & \omega_{\text{ж}_2}^{250} = 2,56 \text{ м/сек} \\ \omega_{\text{ж}_1}^{340} = 2,82 \text{ м/сек} & \omega_{\text{ж}_2}^{340} = 2,3 \text{ м/сек} \end{array}$$

В случае нагревания трубы электрическим током необходимая поверхность нагревания составит

при  $t_{ст} = 380^\circ \text{C}$ :

$$F_1^{380} = \frac{381\,000}{2000} = 190,5 \text{ м}^2 \quad F_2^{380} = \frac{112\,737}{2000} = 55,63 \text{ м}^2$$

при  $t_{ст} = 400^\circ \text{C}$ :

$$F_1^{400} = \frac{381\,000}{1\,200\,000} = 0,32 \text{ м}^2 \quad F_2^{400} = \frac{112\,737}{1\,200\,000} = 0,094 \text{ м}^2$$

В случае нагревания газо-жидкостной смеси продуктами сгорания жидкого топлива, зная состав продуктов сгорания, по формулам (26), (27), (30) определяется теплопроводность, плотность, теплоемкость, вязкость каждого компонента и всей смеси, после чего по формуле (31) находится коэффициент теплоотдачи.

Для упрощения расчета в качестве продуктов сгорания примем воздух, средняя температура которого  $700^\circ \text{C}$ . Тогда:

$$\gamma_v^{700} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{973} = 0,362 \text{ кг/м}^3$$

$$\mu_v^{700} = 173 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 124}{973 + 124} \left( \frac{973}{273} \right)^{3/4} = 4,22 \cdot 10^{-4} \text{ пас} = 4,32 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{сек/м}^2$$

$$c_p^{700} = 0,265 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{град)}$$

$$\lambda^{700} = 4880 \cdot 4,32 \cdot 10^{-6} \cdot 0,265 \cdot 9,81 = 0,055 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}$$

Определим коэффициент теплоотдачи, если диаметр наружной трубы 32 мм, скорость газа 10 м/сек:

$$\text{Nu} = 0,21 \text{Re}^{0,65} = 0,21 \left( \frac{10 \cdot 0,032 \cdot 0,362}{4,32 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81} \right)^{0,65} = 8,06$$

$$\alpha_n = \frac{8,06 \cdot 0,055}{0,032} = 13,9 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}$$

Определим коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{13,9} + \frac{0,004}{15} + \frac{1}{2000}} = 13,7 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}$$

Определим поверхность теплообмена:

$$F_1 = \frac{381\,000}{13,7 \cdot 405} = 68,6 \text{ м}^2$$

$$F_2 = \frac{112\,737}{13,7 \cdot 370} = 22,2 \text{ м}^2$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. З. А. Арзамасова, З. Н. Александровская. Санитарная очистка городов, Госстройиздат, 1966.
2. C. N. Sawyer, J. Water Poll. Contr. Fed., 32, 1274 (1960).
3. J. C. Sager, Water a. Sewage Works, 111, 393 (1964).
4. J. C. Sager, J. Water Poll. Control Fed., 37, 1243 (1965).
5. Am. City, 79, 74 (1964).
6. E. B. Fox, Am. City, 76, № 8, 102, 139 (1961).
7. Am. City, 85, 102 (1964).
8. Франц. пат. 1313008, 1962.
9. Am. City, 79, № 12, 69 (1964).
10. Water Works Waster Eng., 2, № 9, 70 (1965).
11. Авт. свид. 148034, 1962.
12. Пат. США 2703749, 1955.
13. Швейцарск. пат. 400425, 1966.
14. Пат. ФРГ 1207896, 1966.
15. Пат. США 3027854, 1957.
16. J. Water Poll. Contr. Fed., 32, 1332 (1960).
17. M. B. Owen, Water a. Sewage Works, 106, 442 (1959).
18. M. B. Owen, Water a. Sewage Works, 107; Reference Number, 328 (1960).
19. E. R. Davis, J. Sanit. Eng. Dic. Proc. Am. Soc. Civil Engrs, 83, SA1, 1173 (1957).
20. C. J. Ginder, J. Boston Soc. Civil Engrs, 49, 297 (1962).
21. M. B. Owen, J. Sanit. Eng. Dic. Proc. Am. Soc. Civil Engrs, 83, 1172 (1957).
22. C. G. Pettit, J. Sanit. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civil Engrs, 85, SA6, Part 1, 17 (1959).
23. E. Guccione, Chem. Eng., 73, 144 (1966).
24. Японск. пат. 23052, 1964.
25. Франц. пат. 1334386, 1963.
26. Ind. Gas, 43, 6 (1964).
27. A. S. Bailey, Tappi, 47, A165 (1964).
28. C. Serku, Wastes Eng., 30, 18 (1959).
29. Японск. пат. 1645, 1960.
30. Японск. пат. 40177, 1963.
31. Авт. свид. 186612, 1966.
32. Авт. свид. 186613, 1966.
33. H. W. Marson, J. Proc. Inst. Sewage Purific., № 4, 320 (1965).
34. J. J. O. Gravel, H. G. Barley, Pulp. a. Paper Mag. Canada, 67, T73, T105 (1966).
35. T. Helfgott, P. Webber, Water Works Wastes Eng., 2, 76 (1965).
36. F. J. Slaby, Pulp a. Paper, 40, 34 (1966).
37. Yasuda Masukadzu, Chem. Factory, Караку кодзе, 8, 77 (1964).
38. И. П. Мухленов, Т. Н. Розова, М. Ф. Михалев, ЖПХ, 35, 1511 (1962).
39. И. Г. Лесохин, ЖПХ, 35, 1949 (1962).
40. Теплоэнергетика, № 7, 87 (1965).



79. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964—1965 гг. (секция промтеплоэнергетическая), МЭИ, 1965.
80. Л. Н. Седелъковский, В. Н. Шевелев, Г. П. Треножников, Хим. пром., № 1, 42—46 (1967).
81. J. E. Overgall, Am. Paper Ind., 48, № 2, 51 (1966).
82. Chem. Process (USA), 28, № 10, 58 (1965).
83. Шведск. пат. 90896, 1937.
84. E. Fisher, Gesammelte Abhandlung der Kohle, 4, № 5 (1920).
85. E. Fisher, Gesammelte Abhandlung der Kohle, 4, № 6 (1922).
86. K. Cederquist, Sv. Papperstidning, 58, 154 (1955).
87. Авт. свид. 101199, 1951.
88. Б. В. Крысинский, Е. В. Горчакова, Гидролиз. и лесохим. пром., № 7, 23 (1957).
89. Чехосл. пат. 83685, 1955.
90. Power. Eng., № 1, 88 (1959).
91. E. Hurwitz, J. Water Poll. Control Feder., 32, 918 (1960).
92. J. Sanit. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civil Engrs, 85, SA4, 13 (1959).
93. F. I. Zimmermann, Water Waste Treat. J., 8, 531 (1961).
94. Power Eng., № 12, 60 (1955).
95. Англ. пат. 694458, 1959.
96. R. F. Schmidt, Der Nassverbrennung organischer Abwasser. Oster Was-sermirtsch, 9, № 8, 9, 186 (1957).
97. Ф. Мейнк, Г. Штофф, Г. Кольшюттер, Очистка промышленных сточных вод, Гостоптехиздат, 1963.
98. F. I. Angened, Brennstoff-Wärme-Kraft, 18, 252 (1966).
99. S. Neal, Vattenhygien, 21, 47 (1965).
100. R. Vrijburg, Water, 50, 313 (1966).
101. Пат. США 2903425, 1959.
102. Пат. ФРГ 9771013, 1950.
103. Пат. США 2932613, 1960.
104. F. I. Zimmermann, Chem. Eng., 65, 417 (1958).
105. G. H. Teletzke, Chem. Eng. Progr., 60, 33 (1964).
106. U. Lohmann, A. Tilly, Chem. Ingr. Techn., 37, 913 (1965).
107. McKinley, B. Johnson, Water Works a. Wastes Eng., 2, 97 (1965).
108. F. Blikstad, Nork Skogindustri, № 5, 172 (1956).
109. F. I. Zimmermann, D. C. Diddams, Tappi, 43, 710 (1960).
110. Б. В. Крысинский, Вестн. техн. и эконом. информ., № 6—7 (1961).
111. Авт. свид. 173142, 1963.
112. Б. В. Крысинский, Э. М. Иванова, К. К. Козаченко, Л. С. Плетева, сб. «Химия и технология продуктов органического синтеза. Полупродукты для синтеза полиамидов», 1963, стр. 149.
113. В. М. Иванов, С. С. Крамаренко, Труды ИГи АН СССР, т. XIX, 1962, стр. 95.
114. R. W. Nicholson, D. I. Pedro, I. Martinek, Am. City, 81, 97 (1966).
115. I. R. Simpson, J. Inst. Public Health Engrs, 61, 235 (1962).
116. Пат. США 2850361, 1956.
117. B. Brunes, T. Iornberg, S. E. Ionsson, Sv. Papperstidning, 58, 332 (1955).
118. Тезисы докладов Всесоюзн. научн. конференции по санитар. охране водоемов, Ин-т коммунальной гигиены им. Сысина, 1960.
119. Б. В. Капторович, С. С. Крамаренко, сб. «Обогащение и комплексное использование топлива», Изд. «Недра», 1965, стр. 45.
120. Н. П. Дроздов, Гидролиз. и лесохим. пром., № 3, 18 (1965).
121. O. Abbeg, I. Elster, Erdöl u. Kohle, № 9, 721 (1962).
122. S. A. Zieminski, R. I. Martyn, Tappi, № 11, 878 (1962).
123. Ю. Н. Турский, Очистка производственных сточных вод, Изд. «Химия», 1967, стр. 245.

124. I. Holluta, K. Hochmüller, Von Wasser, 26 (1959); Weinheim, № 146 (1960).
125. A. Foulon, Industrie-Anzeiger, 87, 1610 (1965).
126. А. П. Шестов, Д. А. Гуревич, Н. И. Владимиров, Е. А. Вакурова, Техн. и экон. информ. Сер. «Очистка сточных вод и отходящих газов в хим. и нефтехим. пром.», вып. 4, 14 (1965).
127. Авт. свид. 185432, 1964.
128. Пат. США 3090675, 1962.
129. Пат. США 3207201, 1963.
130. Пат. США 3215501, 1962.
131. А. М. Нагиев, А. С. Мустафабекова, Труды ВНИИТБ, вып. XII, 1959.
132. Англ. пат. 942375, 1962.
133. Пат. США 3134424, 1960.
134. Франц. пат. 1339292, 1962.
135. Пат. США 3194215, 1962.
136. W. Strauss, Chem. a. Process Eng., 46, 133 (1965).
137. D. McKenzie, Am. City, 81, 80 (1966).
138. В. П. Лазарев, Ю. П. Медников, А. И. Щелоков, Водоснабжение и сантехника, № 1, 35 (1967).
139. I. D. Hajek, E. E. Ludwig, Petr. Eng., № 6, 31 (1960).
140. А. С. Лапидус, Журн. ВХО, 9, 299 (1964).
141. А. С. Лапидус, Безоп. труда в пром., № 11, 51 (1966).
142. А. М. Нагиев, П. П. Дирин, Труды ВНИИТБ, вып. XII, 1959, стр. 92.
143. Erdöl u. Kohle, № 9, 797 (1959).
144. O. Spiesker, Wasser, Luft und Betrieb, 6, 109 (1962).
145. Франц. пат. 1342997, 1962.
146. Авт. свид. 130142, 1957.
147. P. D. Miller, Oil Gas J., 56, 36 (1958).
148. Petrol. Ref., 37, 148 (1958).
149. P. Sherwood, Erdöl u. Kohle, № 7, 490 (1960).
150. Walter Leo, Mass Prod., 41, 45 (1965).
151. Z. Keram, 16, 207 (1964).
152. Chemiewasern, № 9, 610 (1964).
153. A. Foulon, Plast Verarbeiter, 16, 211 (1965).
154. H. West. G. Jüngst, VDI-Nachr., 18, № 32, 14 (1964).
155. F. Rüb, VDI-Nachr., 18, № 32, 14 (1964).
156. J. C. Allingham, Ind. Finish, 16, 35 (1964).
157. A. P. Banner, E. M. Ilgenfritz, J. Air Poll. Control Assoc., 13 610 (1963).
158. G. Jüngst, VDI-Nachr., 18, № 50, 13 (1964).
159. O. tobe Tosidsi, Chem. Factory, Караку кодае, 9, 65 (2965).
160. E. C. Betz, H. J. Feist, Ind. Anzeiger, 86, 2153 (1964).
161. E. Herrmann, Chem. Ind. Techn., 37, T77 (1965).
162. К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков, Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, Изд. «Химия», 1964.
163. О. Хоуген, К. Ватсон, Физико-химические расчеты в технике, Госхимиздат, 1941.
164. В. Х. Мак-Адамс, Теплопередача, Металлургиздат, 1961.
165. М. П. Вуклович, Теплофизические свойства воды и водяного пара, Изд. «Машиностроение», 1967.
166. Справочник по разделению газовых смесей, под ред. Н. И. Гальперна, Госхимиздат, 1963, стр. 280.
167. Д. Кей, Т. Лэби, Таблицы физических и химических постоянных, Физматгиз, 1962.
168. В. Н. Соколов, Автореф. докт. дисс., ЛТИ им. Ленсовета, 1965.
169. В. Н. Соколов, М. Д. Бушков, Процессы химической технологии, Изд. «Наука», 1965.

170. А. А. Арманд, Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления, Изд. АН СССР, 1955.
171. А. П. Бродский, Физическая химия, т. II, Госхимиздат, 1949, стр. 507.
172. М. И. Левина, Н. П. Спцборовская, ЖПХ, № 12, 653 (1938).
173. T. P. Quirk, J. Water Poll. Control Federat., 36, № 11, 1355 (1964).
174. Wastes Engng., 30, № 1, 18 (1959).
175. F. J. Zimmermann, Power Engineering, № 1, 88 (1959).

*Дополнительная литература*

к главе 1

- R. Braun, Chem. Rundschau, 17, № 25, 750 (1964).
- A. O. Hermann, Chem. Ingr., 36, № 4, 343 (1964).
- A. Rabb, Hydrocarbon Process a. Petrol. Ref., № 4, 149 (1965).
- J. Sibiga, Gaz, voda i techn. sanit., 40, № 39, 312 (1966).
- L. W. Weller, W. R. Condon, Bull. Eng. a. Arch. № 56, 15 (1966).
- Chem. Ingr. Techn., 39, № 1, A39 (1967).
- Prakt. Chem., 13, № 5, 185 (1962).
- Techn. Mitt., 59, № 7, 315 (1966).

к главе 2

- Н. П. Дроздов, А. П. Киселев, Ф. П. Шпранкова, Гидролизн. и лесохим. пром., № 4, 7 (1966).
- Б. И. Иванов, В. В. Жахов, Труды ВНИИТ, вып. 11, Гостоптехиздат, 1962, стр. 277.
- Б. И. Иванов и др., Труды ВНИИТ, вып. 12, Гостоптехиздат, 1963, стр. 271.
- С. С. Крамаренко, Обогащение и комплексное использование топлива, Изд. «Недра», 1965, стр. 179.
- Э. А. Куляев, Б. М. Менкин, М. Е. Писаревский, Н. Я. Степ, В. А. Щербин, Хим. пром., № 5, 380 (1965).
- В. А. Савельева, Б. В. Крысинский, Гигиена и санитария, № 8, 7 (1962).
- Е. П. Салтанов, Е. П. Казаматкин, К. А. Лобашов, Хим. пром., № 1, 32 (1968).
- Б. Р. Серебряков, М. А. Далин и др., Хим. пром., № 7, 505 (1966).
- Л. И. Шмидт, Л. И. Горелик, Ю. Л. Пономарев, Обезвреживание промышленных стоков химических производств, Материалы всесоюзн. совещания, Черкассы, 1967.
- Д. Ф. Царик, Водоснабжение и сантехника, № 10, 10 (1962).
- Авт. свид. 190283, 1965.
- Авт. свид. 178793, 1964.
- O. Abbe, Erdöl u. Kohle, 14, 621 (1961).
- К. Р. Веcker, Industrieabwasser, № 6, 46 (1966).
- E. Chabettary, R. A. Wulf, J. Bernstein, E. Heruiz, Ind. a. Eng. Chem., 51, 1301 (1959).
- A. Grossman, J. Pasynkiewicz, Koks, smola, gaz, 9, 555 (1964).
- E. Guccione, Chem. Eng., 71, 118 (1964).
- J. C. Harding, G. E. Griffin, J. Water Poll. Control. Federat., 37, 1134 (1965).
- D. Hopfe, Fortschr. Wasserchem., № 3, 95 (1965).
- C. H. Howard, Chem. Coal Utilisation, № 7, 346 (1948).
- E. Hurwitz, G. H. Teletzke, W. B. Gitchel, Water a. Sewage Works, 112, 298 (1965).
- J. F. Kefford, Austral. Food Manufact., 34, 54 (1964).
- D. T. Lauria, Power Eng., 63, № 4, 80 (1959).
- H. Renter, Chem. Ind., 18, № 9, 517 (1966).

- B. A. Scheidt, E. Hurwitz, Public Works, № 1, 105 (1961).  
B. A. Scheidt, E. Hurwitz, Gas u. wassertach, № 20, 509 (1961).  
O. J. Sproul, D. W. Ruckman, Tribuna SEVEDEAU, 15, № 227, 478 (1962).  
R. Stricker, Drvna ind., 10, № 9—10, 159 (1959).  
S. Türkölmer, Vom Wasser, 31, 153 (1964).  
F. I. Zimmermann, Ind. Water a. Wastes, 6, 102 (1961).  
Установка ЗИМПРО для мокрого окисления канализационного шлама воздухом, Проспект фирмы Sterling Drug (USA).  
Вэсацу караку коре, 3, № 3, 245 (1959).  
J. Sanit. Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civil Eng., 85, № 4, Part 1, 13 (1959).  
Wastes Eng., 25, № 1 (1959).  
Датск. пат. 102022, 1962.  
Пат. ГДР 48366, 1965.  
Пат. США 3027854, 1962.  
Пат. ФРГ 1051210, 1959.  
Чехосл. пат. 104266, 1962.

к главе 3

- Л. В. Бирюкова, А. М. Миронов, Хим. пром., № 4, 281 (1967).  
E. Betz, Maschinenmarkt, 70, 12 (1964).  
J. Cadenbach, Z. ang. Chem., 46, 130 (1933).  
L. S. Caretto, K. Nobe, Ind. a. Eng. Chem. Process Design a. Development, 5, 217 (1966).  
T. J. Diviney, Water a. Wasres Eng., 4, 57 (1967).  
E. H. Johnson, U. S. Dept. Com., Office Tech. Serv. PB Rept., 157712, 1960.  
A. E. Martin, Chem. Process (USA), 26, 46 (1963).  
W. Niedel, Chem. Techn., 18, 266 (1966).  
D. H. Stormont, Oil a. Gas. J., 58, 102 (1960).  
E. Wicke, Chem. Ingr. Techn., 37, 892 (1965).  
Verpack-Rundschau, 17 (1966); Verpack — Mag. Ausg. 10, 78 (1966).  
Пат. США 3207675, 1961.  
Пат. США 3064719, 1961.  
Я. С. Глозштейн, Д. В. Карпов, Л. Н. Муромский, Н. В. Арапов, Использование газа в промышленных печах, Изд. «Недра», 1967.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>Глава 1. Обезвреживание твердых промышленных отходов. Общая характеристика, классификация и способы их обезвреживания . . . . .</b>	<b>6</b>
Обезвреживание отходов в камерных печах . . . . .	10
Сжигание отходов в многоподовых печах . . . . .	17
Сжигание отходов в барабанных печах . . . . .	21
Обезвреживание отходов в циклонных печах . . . . .	26
Сжигание отходов в распылительных печах . . . . .	27
Обезвреживание отходов в печах с псевдоожиженным слоем . . . . .	30
<b>Глава 2. Обезвреживание жидких отходов. Общая характеристика, классификация и выбор способа обезвреживания . . . . .</b>	<b>35</b>
Обезвреживание ПСВ-г в камерных и шахтных печах . . . . .	38
Сжигание ПСВ-г в циклонных топках . . . . .	46
Сжигание ПСВ-г в печах с псевдоожиженным слоем . . . . .	50
Обезвреживание ПСВ-г методом «мокрого сжигания» . . . . .	53
<b>Глава 3. Обезвреживание газообразных отходов. Общая характеристика, классификация и методы обезвреживания . . . . .</b>	<b>64</b>
Прямое сжигание ПГО в печах . . . . .	67
Каталитическое сжигание ПГО . . . . .	79
<b>Глава 4. Технико-экономическое сравнение различных схем термического обезвреживания промышленных отходов . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>Приложение . . . . .</b>	<b>86</b>
Методика расчета аппаратов установки непрерывного действия для обезвреживания ПСВ-г мокрым сжиганием . . . . .	86
Расчет установки по обезвреживанию сточных вод методом «мокрого сжигания» (практический пример) . . . . .	89
Расчет объема реактора . . . . .	90
Тепловой расчет установки . . . . .	95
Гидродинамический расчет установки . . . . .	98
<b>Л и т е р а т у р а . . . . .</b>	<b>104</b>

ГИИХ — Выпуск 61

**ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**

с. 112

Издательство «Химия», Ленинградское отделение  
Невский пр., 28

Редактор З. И. Грива  
Технический редактор З. Е. Маркова  
Корректор В. Б. Генгут

---

Сдано в набор 14/X 1968 г. Подписано к печати 16/I 1969 г.  
Бумага типогр. № 2. Формат 60 × 90<sup>1/16</sup>. Уч.-изд. л. 7,32.  
Печ. л. 7. М-09753. Тираж 5100 экз. Цена 59 коп. Заказ 2457.

---

Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник»  
Главполиграфиромы Комитета по печати  
при Совете Министров СССР.  
Московский пр., 91.