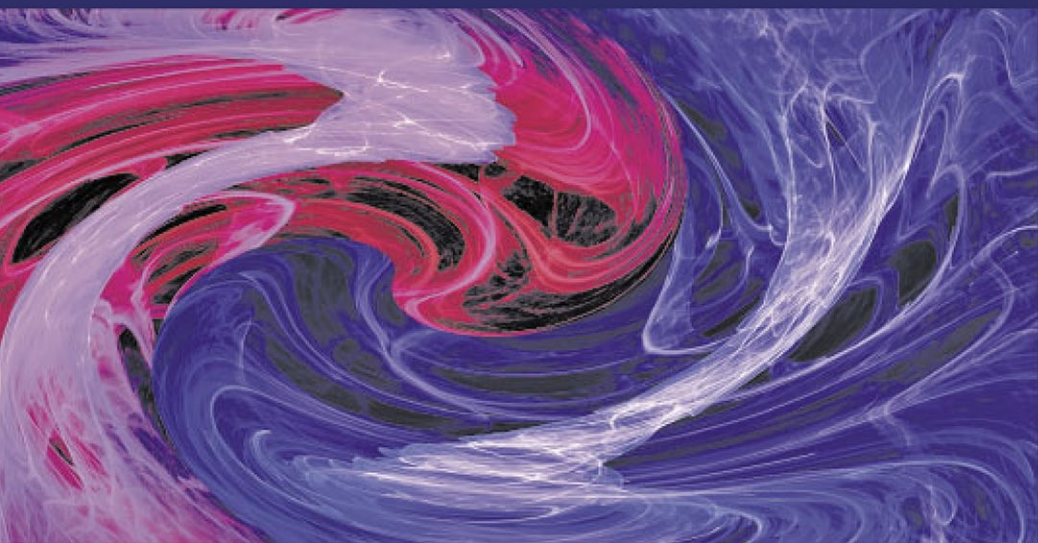


Булатов И. С.

ПИНЧ-ТЕХНОЛОГИЯ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

И. С. Булатов

ПИНЧ-ТЕХНОЛОГИЯ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

СТРАТА

Санкт-Петербург
2012

УДК 338.45: 662.6

ББК 31.15

Б 90

Рецензенты: Член-корреспондент РАН, профессор, д. т. н. **Мешалкин В. П.**
(РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия)
Ректор НТУ ХПИ, профессор, д. т. н. **Товажнянский Л. Л.**
Профессор НТУ ХПИ, к. т. н. **Капустенко П. А.**
(Национальный Технический Университет «Харьковский
Политехнический Институт», Украина)

Б 90 Булатов И. С.

Пинч-технология. Энергосбережение в промышленности –
СПб.: Страта, 2012. – 140 с.

ISBN 978-586983-113-2

В монографии рассмотрены вопросы интегрирования тепла и энергии с использованием пинч-технологии, которая зарекомендовала себя как одна из наиболее эффективных концепций энергосбережения в перерабатывающей промышленности. Книга предназначена для студентов, аспирантов, инженеров-проектировщиков, инженеров-технологов и энергетиков промышленных предприятий.

ISBN 978-586983-113-2

© И. С.Булатов, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.	5
ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION.	8
ГЛАВА I. СОСТАВНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ КРИВЫЕ.	13
1.1. Энтальпийные диаграммы тепловых потоков.	13
1.2. Составные тепловые кривые технологических потоков	20
ГЛАВА II. ПИНЧ-МЕТОД.	23
2.1. Сущность пинч-метода	23
2.2. Эвристические правила проектирования оптимальных энергосберегающих ХТС на основе пинч-метода	25
ГЛАВА III. ТАБЛИЧНЫЙ АЛГОРИТМ И СЕТОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ	33
3.1. Табличный алгоритм определения целевых значений рекуперированной в ХТС энергии.	33
3.2. Методика построения сеточных диаграмм	42
ГЛАВА IV. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ С МАКСИМАЛЬНОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА.	47
ГЛАВА V. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КОМПРОМИССЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.	59
5.1. Локальные и глобальные экономические компромиссы	59
5.2. Экономические компромиссы «капитальные затраты – расход энергии»	61
5.3. Прогнозирование величины капитальных затрат на проектируемые теплообменные системы.	67
5.4. Определение глобальных значений целевых функций (капитальных и эксплуатационных затрат) при проектировании оптимальных теплообменных систем	73

ГЛАВА VI. ВЫБОР ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ (УТИЛИТ)	78
6.1. Общие предпосылки к выбору утилит.	78
6.2. Методика выбора утилит технологической схемы с использованием составных кривых	79
6.3. Методика выбора энергоносителей предприятия с использованием больших составных кривых	84
6.4. Области применения больших составных кривых	87
Тепловые машины	93
Тепловые насосы	99
 ГЛАВА VII. ПИНЧ-МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ	 103
7.1. Существующие методы реконструкции теплообменных систем ...	103
7.2. Теоретические основы пинч-метода реконструкции теплообменных систем с использованием действующих теплообменников	105
Ограничения в структуре теплообменных систем с использованием действующих теплообменников	105
Определение пинч-точки теплообменных систем.	107
Кривые целевых значений для реконструируемых теплообменных систем с использованием действующих теплообменников	109
Устранение пинча теплообменной системы.	112
Выбор изменений структуры при реконструкции теплообменной системы	112
Определение возможности разделения потоков в теплообменной системе.	114
7.3. Комплексный алгоритм оптимальной реконструкции теплообменной системы с использованием действующих теплообменников	115
Этап диагностики и структурных изменений	116
Этап оптимизации	117
 ГЛАВА VIII. ПИНЧ-МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ	 119
8.1. Расширенный пинч-метод для проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов	119
Энергетическая кривая производственного комплекса.	120
Большая составная кривая энергоресурсов производственного комплекса	125
8.2. Пример проектирования оптимального энергосберегающего комплекса первичной нефтепереработки	127
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION	 132
 ПРИЛОЖЕНИЕ: Список рекомендуемой литературы	 135
 ПРИЛОЖЕНИЕ: Глоссарий	 139

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наличие больших запасов природных сырьевых и топливно-энергетических ресурсов в бывшем Советском Союзе привело в 80-х годах прошлого столетия к ситуации, когда при наращивании объемов производства практически прямо пропорционально росли потери ресурсов. В итоге, например, расход энергии на единицу продукции, выпускаемой построенными в тот период предприятиями, в полтора-два раза выше, чем на аналогичных предприятиях индустриально развитых стран Западной Европы, которые успешно преодолели энергетический кризис 1970-х годов и последующие этапы роста цен на сырье и энергоносители.

Опасность этой ситуации не только в том, что расходуется больше ресурсов на производство требуемой продукции и уменьшаются их резервы для грядущих поколений. Все непроизводительные потери ресурсов выбрасываются обратно в окружающую среду в виде отходов, стоков, выбросов углекислого газа, что повышает концентрацию опасных для окружающей среды веществ, тепловую эмиссию. Все это ставит под вопрос возможность устойчивого развития общества в долгосрочной перспективе, делает состояние окружающей среды в ряде промышленных регионов катастрофическим. Вклад России, Украины и других стран постсоветского пространства в глобальные процессы ухудшения состояния окружающей среды на планете значительно превышает их долю в общем объеме промышленного производства.

С 1991 года, после распада Советского Союза, в странах на его территории все больше набирают обороты и разворачиваются кампании по энергосбережению. Судя по тем шагам, которые предпринимают руководители независимых государств, это долговременные программы в комплексном плане модернизации промышленности этих стран. Способствовать развитию в этом направлении может применение опыта индустриально развитых стран Европейского Союза и передовых разработок отечественных ученых. Серьезным препятствием для этого является весьма ограниченное количество русскоязычной литературы для широкого круга инженерно-технических работников, специалистов и менеджеров промышленных предприятий,

излагающей в доступной форме основные принципы современных методов рационального использования энергии.

Книга И. С. Булатова «Пинч-технология. Энергосбережение в промышленности» представляет собой краткое и доступное для широкого круга специалистов изложение основных принципов теории интеграции энерго-технологических систем на основе пинч-анализа. Это направление науки о рациональном использовании энергии хорошо зарекомендовало себя при проектировании новых и модернизации действующих промышленных предприятий. Основанная на фундаментальных термодинамических принципах, методология позволяет оценить минимальные экономически целесообразные значения энергопотребления в сложных энерго-технологических системах современных промышленных предприятий и производственно-территориальных комплексов. Это делает пинч-технологии действенным инструментом при энергетическом аудите предприятий, позволяет оценить потенциальные возможности экономии энергии. Энергетический аудит методом пинч-анализа ряда действующих предприятий нефтехимии в России и Украине показал возможность экономии от 30 до 70 % потребляемой энергии, аналогичные показатели получены при обследовании ряда коксохимических комбинатов, сахарных и спиртовых заводов.

Важным этапом совершенствования методологии является развитие пинч-метода проектирования производственных комплексов. Согласно работам, выполненным в Манчестерском университете (The University of Manchester) под руководством профессора Робина Смита (Robin Smith), включение в состав комплекса жилых кварталов позволяет оптимально использовать излишки тепла промышленных предприятий для нужд коммунального теплоснабжения. Успеху в проведении работ по сокращению удельного потребления энергии в странах бывшего социалистического лагеря, вступивших в Европейский Союз, способствовало создание в рамках программы «Мария Кюри» (программа международного обмена научными кадрами «International Research Staff Exchange Scheme») Центра по интеграции технологических процессов в венгерском Университете Паннония в г. Веспрем (Pannon Egyetem, Veszprém) под руководством профессора Йржи Клемеша (Jiří Klemes), до того около тридцати лет проработавшего в Манчестерском университете. Интересны разработки этого центра по совершенствованию методов интеграции процессов для включения в состав территориально-производственного комплекса альтернативных источников энергии.

Особый интерес в книге представляет изложение принципов пинч-технологии представителем кафедры интеграции процессов Манчестерско-

го университета (ранее Научно-технологического института Манчестерского университета – UMIST). На этой кафедре в 1980-х годах положено начало этому плодотворному направлению в науке и в настоящее время проводятся активные исследования, дополняющие и расширяющие возможности прикладного применения методологии. Ранее Игорь Станиславович Булатов окончил РХТУ им. Д. И. Менделеева, где в 1996 году защитил кандидатскую диссертацию и избрал интеграцию технологических процессов как основное направление своей научной деятельности.

Ясная и доступная форма изложения материала на русском языке позволяет надеяться на расширение применения научно обоснованных методов энергосбережения в промышленности России и других стран постсоветского пространства.

*Член-корреспондент РАН, профессор,
д. т. н. Мешалкин В. П.
(РХТУ им. Д. И. Менделеева, Россия)*

*Профессор,
д. т. н. Товажнянский Л. Л.
Профессор НТУ ХПИ,
к. т. н. Капустенко П. А.
(Национальный Технический Университет
«Харьковский Политехнический Институт», Украина)*

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция процессов, очень часто называемая также *пинч-технологией* (*Pinch Technology*), представляет собой семейство технологий, комбинирующих несколько технологических систем для уменьшения потребления ресурсов и (или) сокращения вредных выбросов. *Интеграция процессов* поначалу – с 70-х годов прошлого века – разрабатывалась как *интеграция тепла (и энергии)*, под влиянием энергетического кризиса, охватившего западные страны. За последние 30 лет эта методология нашла широчайшее применение в перерабатывающих отраслях, а также в сфере генерирования энергии. *Интеграция тепла*, как область знаний, исследует потенциальные возможности улучшения и оптимизации теплообмена между источниками и потребителями тепла для сокращения потребностей во внешних энергоресурсах и, следовательно, для уменьшения затрат и выбросов. В настоящее время эта методология обладает широким набором инструментов и процедур, позволяющих проектировать перерабатывающие производства с высочайшим уровнем энергосбережения.

Существует несколько определений *интеграции тепла*. Пожалуй, наиболее полное определение было дано Международным энергетическим агентством (International Energy Agency, IEA): *пинч-технология* – это систематические и обобщенные методы проектирования

INTRODUCTION

Process Integration often referred to as Pinch Technology is a family of technologies which combine several flowsheets to reduce resource consumption and/or minimise emissions. Process Integration initially – from 1970s – was being developed as Heat and Power Integration in the wake of the energy crisis which heavily hit western countries. During last 30 years this methodology has been widely used in process industries and also energy generation. Heat Integration as a field of knowledge, studies potential improvements in and optimisation of heat transfer between heat sources and sinks aimed at reduction of external heat sources (utilities), hence the reduction of costs and emissions. Today, this methodology has a set of tools and procedures which enable the engineer to design processes with the highest possible level of energy saving.

There are quite a few definitions for Heat Integration. Probably the most comprehensive definition is the one given by the International Energy Agency: systematic and general methods for designing integrated production systems ranging from individual processes to total sites and special emphasis on the efficient use of energy and reducing environmental effects.

интегрированных производственных систем от индивидуальных технологических процессов до производственных комплексов с особым упором на эффективное использование ресурсов и уменьшение воздействия на окружающую среду.

Как это часто бывает в науке, ученые из разных стран и университетов совместно с практиками в промышленности, параллельно шли к решению задач повышения энергоэффективности производств. В 70-е годы были опубликованы интересные работы в США, Европе и Японии посвященные термодинамическим подходам при интегрировании тепловых процессов. Систематическую базу под эти исследования в 80-е годы подвели сотрудники Центра, а потом кафедры интеграции процессов под руководством профессора Бодо Линнхоффа из Научно-технологического института Манчестерского университета (в настоящее время это снова Центр интеграции процессов под руководством профессора Робина Смита в Манчестерском университете). Именно кафедра (Центр), стали общепризнанными лидерами в области разработки и применения пинч-технологии. При кафедре (Центре) с первых лет существования был организован и по сей день успешно функционирует Исследовательский консорциум интеграции процессов. В консорциум на разных этапах входили или входят ведущие нефтяные и химические компании, инженерные фирмы и университеты (например, ExxonMobil, British Petroleum, Petrobras, Total, EDF, British Gas, Shell Global Solutions, Saudi Aramco, Universiti Teknologi Petronas, Statoil и др.) Партнеры консорциума

As it is often the case in science and technology, scientists from different countries and universities together with engineers from industry were in parallel searching the energy efficiency improvement solutions. Interesting research works on thermodynamic approaches for heat process integration were published in the 70s in US, Europe and Japan. The systematic basis for that work was provided in the 80s by researchers lead by Professor Bodo Linnhoff at the Centre and later Department of Process Integration, University of Manchester Institute of Science and Technology (at present, it is again the Centre for Process Integration, The University of Manchester, led by Professor Robin Smith). The Department/Centre became the world recognised centre of excellence in Pinch Technology development and application. Shortly after the Center was set up, it established Process Integration Research Consortium. At different times the members of the Consortium included or still include leading oil, petrochemical and chemical companies, engineering firms and universities (e. g. Exxon-Mobil, British Petroleum, Petrobras, Total, EDF, British Gas, Shell Global Solutions, Saudi Aramco, Universiti Teknologi Petronas, Statoil, etc.) The members of the Consortium have access to the latest research of the Centre which otherwise is published only few years later. This definitely gives competitive edge to the Consortium members. The Centre also provides tailor-made research for the Consor-

получают доступ к новейшим исследованиям Центра, результаты которых публикуются спустя лишь несколько лет, что дает неоспоримое конкурентное преимущество участникам консорциума. Центр также осуществляет исследовательские работы непосредственно в интересах партнеров консорциума. Для усиления коммерческой составляющей во времена Бодо Линнхоффа при кафедре была создана компания Linnhoff-March Ltd, а после его ухода полностью в бизнес была организована компания Process Integration Ltd, являющаяся спин-офф компанией Манчестерского университета. Тесное взаимодействие с Центром позволяет компании предлагать клиентам технологические решения с учетом новейших разработок в области интеграции процессов.

В России и странах бывшего Советского Союза эта технология не слишком известна и распространена. Специалисты знакомились с ней в основном по собственной инициативе из интереса и энтузиазма. Однако широко, систематического преподавания этой дисциплины студентам и инженерам, повышающих квалификацию, в основной массе университетов пока не наблюдается. Также очень мало (по сравнению с другими странами) опубликовано материалов – учебных, информационных, исследовательских статей. Есть несколько исключений. С 1993 года Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Украины при поддержке Британского совета начал работы по распространению этой технологии. В настоящее время интегрированные технологии и энергосбережение

tium members. To boost the commercialisation of research results, Bodo Linnhoff founded Linnhoff-March Ltd, and after he switched entirely to business, Process Integration Ltd was set up which is a spin-off company of The University of Manchester. The company's tightest links with the Centre give it an opportunity to provide technological solutions which are based on the latest research in process integration.

In Russia and other FSU countries, this technology is not very much wide-spread and known. Engineers learnt about it on their own initiative out of interest and enthusiasm. However even these days there is no wide-spread and systematic teaching of this discipline to students and engineers at universities and continuous professional development courses en masse. Also there are very scarce (compared to other countries) published teaching materials, information bulletines, research papers on the topic. There are a few exceptions. From 1993, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» started technology dissemination activities with the support of British Council. Nowadays integrated technologies and energy saving is one of the degree courses at the university. The university publishes a specialised journal and there have been quite a few successful joint projects with the industry. From 1997, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia supported by Tempus Tacis European programme also started developing

является одной из специализаций в этом университете. Также издается специализированный журнал и успешно осуществлены многие проекты с промышленностью. С 1997 года в Российском химико-технологическом университете им. Д. И. Менделеева при поддержке европейской программы Tempus Tacis также разработаны учебные программы в области ресурсосбережения на основе технологии интеграции процессов. С приходом западных инжиниринговых компаний на российский рынок все больше специалистов узнают об этой технологии и начинают ею пользоваться. К сожалению, некоторые недобросовестные западные партнеры уже успели оставить негативное впечатление о технологии, когда заявляя о владении know-how и применении пинч-технологии в своих проектах, они предлагали заведомо непрофессиональные решения.

Следует отметить, что в момент зарождения пинч-технологии существовало жесткое разделение между исследователями на «термодинамиков», исповедующих термодинамические подходы к проектированию технологических систем (а пинч-технология относится как раз к термодинамическим методам), и «математиками», использующими математические методы для этих же целей. К настоящему времени эти споры в значительной степени неактуальны: исследователи и проектировщики пользуются обоими подходами, успешно комбинируя их на разных этапах проектирования.

Данная работа является очень кратким обзором базовых положений пинч-технологии применительно только к интеграции тепла и энергии. (Напомним,

courses on resource saving based on process integration technologies. With western companies actively entering the Russian and FSU markets, more and more engineers learn about the technology and start applying it in their work. Unfortunately, some western companies have already left negative impression of the technology when claiming application of pinch technology and know-how they offered poor solutions.

It should be noted that in the time when pinch technology was being developed, there was a visible division between researchers who used thermodynamic methods for process design (to which pinch technology belongs) and mathematical methods. These days, those different approaches are rather combined at different stages of design providing successful solutions.

This work is a very brief review of the Pinch Technology basics regarding heat and power integration only. (Just a reminder, that by now, there is a whole range of process integration applications including mass and water pinch, hydrogen pinch, etc). The aim of the brochure is not to teach the details and subtleties of the technology. The aim is rather to prepare the reader to a further more profound study of the technology, to show how application of even the technology basic tools can increase energy saving in process industries. Since the technology described was developed at the Department/Centre for Process Integration and the brochure is fully based on the materials

что к настоящему времени существует целый спектр областей ее применения включая водный и массовый пинч, водородный пинч, и т.д.) Она не ставит задачу научить тонкостям этой технологии. Скорее, это попытка подготовить читателя к дальнейшему, более глубокому изучению этой технологии, показать, как применение даже базовых положений и инструментов этой технологии способно повысить энергосбережение перерабатывающих производств. Поскольку описываемая технология была разработана на кафедре (в центре) интеграции процессов и книга полностью составлена по материалам кафедры (центра), то ссылок на литературные источники в тексте не дается. Вместо этого в конце прилагается список рекомендуемой литературы, который включает в себя ключевые публикации и монографии по данной теме.

Автор и издательство выражают искреннюю признательность руководителю компании Process Integration Ltd профессору Робину Смиту, а также президенту международного консорциума HTRI Клодет Бейер за поддержку в опубликовании данной работы. Большая благодарность научному редактору д. т. н., проф., действ. члену АТН РФ Аджиеву А. Ю. Также большую помощь в подготовке материалов книги оказали член-корр. РАН, профессор, д. т. н. Мешалкин В. П. (РХТУ им. Д. И. Менделеева), ректор НТУ ХПИ, профессор, д. т. н. Товажнянский Л. Л. и профессор этого Университета, к. т. н. Капустенко П. А.

*С. Л. Деменок, к. т. н.
И. С. Булатов, к. т. н.*

of the Department/Centre, no literature references are given in the text. However, instead there is a list of recommended literature which includes key publications and books on the topic.

The author and the publishing house would like to express their sincere gratitude to Director of Process Integration Limited Professor Robin Smith and to President of HTRI International Consortium, Ms Claudette D. Beyer for the support in publishing this book. A special thank goes to the scientific editor, Member of Russian Academy of Technological Sciences Professor Ali Adzhiev. Our thanks and appreciation to Corresponding Member of Russian Academy of Sciences Professor Valery Meshalkin (Mendeleev University of Chemical Technology of Russia), Rector of National Technical University–Kharkiv Polytechnic Institute Professor Leonid Tovazhnyanskiy and Professor Petro Kapustenko of the same university for their great help in preparing the book.

*Dr S. Demenok
Dr I. Bulatov*

ГЛАВА I

СОСТАВНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ КРИВЫЕ

1.1 Энтальпийные диаграммы тепловых потоков

Согласно методологии проектирования технологических систем в перерабатывающих отраслях промышленности, проектирование начинается с реактора, затем разрабатывается система разделения, потом система теплообменников (СТ), далее система внешних энергоресурсов – энергоисточников и энергопотребителей, которую в дальнейшем мы будем называть системой утилит (utilities). Казалось бы, что для разработки начального варианта проекта технологической системы в целом должны быть рассчитаны полностью СТ и систем утилит. Однако, на самом деле, полное проектирование этих подсистем вовсе не обязательно для оценки проекта технологической системы в целом. Применяемые сегодня методы позволяют оценить функционирование всей технологической системы без реального полного проектирования этих подсистем: систем теплообменников, разделения и утилит. Достаточно задать целевые значения по энергии и капитальным затратам для системы теплообменников и утилит. После этого можно анализировать быстро и удобно большое число проектных альтернатив для технологической системы в целом.

В то же время, если бы мы полностью рассчитывали эти элементы технологической схемы для каждого альтернативного варианта проекта, проанализировать такое огромное количество вариантов было бы практически невозможно ни по времени, ни по усилиям. Метод расчета систем теплообменников и утилит на основе термодинамического подхода был предложен учеными кафедры интеграции процессов Научно-технологического института Манчестерского университета (Department of Process Integration, UMIST, UK), в настоящее время Центр интеграции процессов Манчестерского университета. Чтобы понимать как можно задавать целевые показатели для системы теплообменников и систем утилит нужно четко представлять, что лежит в основе этого метода.

Горячие потоки в химико-технологической системе (ХТС, в дальнейшем по тексту часто будем называть технологической схемой) можно изобразить в системе координат «энтальпия – температура» в виде отрезков прямых линий, направленных справа налево, показывающих уменьшение энтальпии. Холодные потоки в системе координат «энтальпия – температура» изображаются в виде

отрезков линий, направленных слева направо, показывающих увеличение энтальпии (рис. 1.1 и рис. 1.2). При этом нужно иметь в виду, что термины «горячие» и «холодные» потоки не подразумевают, что температуры одних потоков выше температур других потоков. В теории интеграции процессов, «горячим» считается поток, который требуется охладить, а «холодным» поток, который нужно нагреть безотносительно того, какие у них температуры.

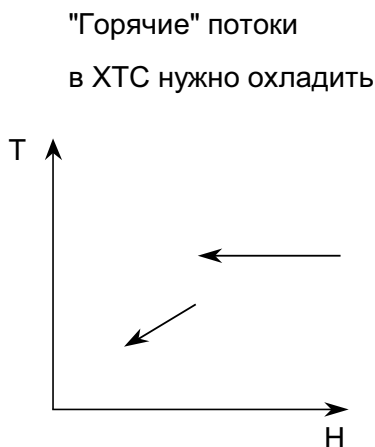


Рис. 1.1. Энтальпийные диаграммы «энтальпия – температура» для горячих потоков ХТС

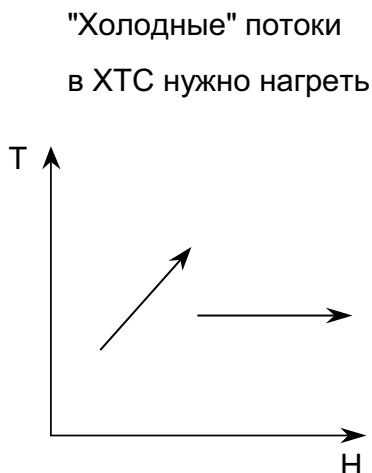


Рис. 1.2. Энтальпийные диаграммы «энтальпия – температура» для холодных потоков ХТС

Рассмотрим противоточный теплообменник, на входе которого технологический поток имеет температуру 20°C , а на выходе 50°C (рис. 1.3). На этом же рисунке приведены основные формулы, используемые в настоящем курсе для анализа теплообменных процессов.

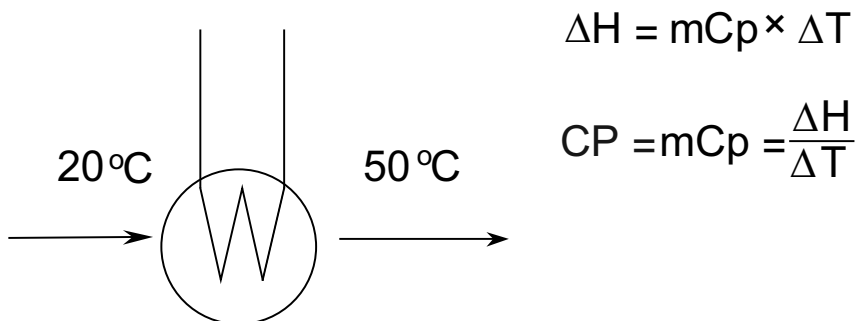


Рис. 1.3. Противоточный теплообменный аппарат: ΔH – тепловая нагрузка на теплообменник; m – массовый расход технологического потока; C_p – теплоемкость потока; CP – потоковая теплоемкость

Рассмотрим пример построения энтальпийных диаграмм для двух теплообменников некоторой технологической схемы (рис. 1.4). Предполагаем, что в этой схеме оба теплообменника противоточные. Напомним, что именно разность температур является движущей силой процесса теплообмена. Пусть минимальная разность температур на концах теплообменника ($\Delta T_{\min}$) задана равной 20°C (условие физической реализуемости процесса теплообмена). Определим, для какого теплообменника нарушается это условие.

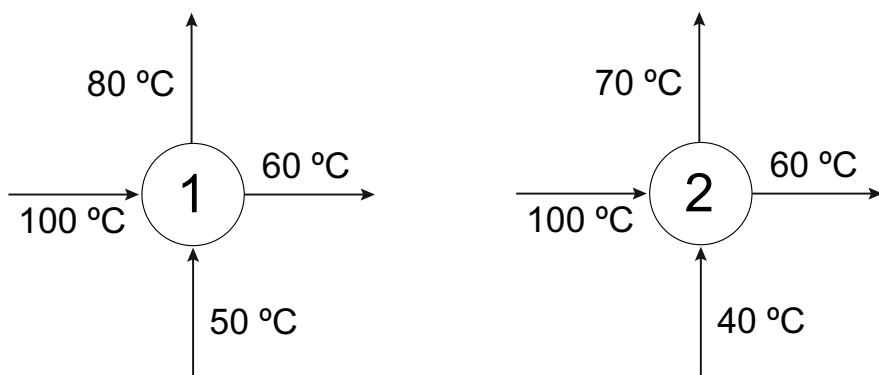


Рис. 1.4. Два противоточных теплообменника некоторой технологической схемы

При изображении данных тепловых потоков на энтальпийной диаграмме в системе координат Т-Н можно легко обнаружить для какого из теплообменников нарушается заданное значение $\Delta T_{\min}$. Это теплообменник № 1 (рис. 1.5).

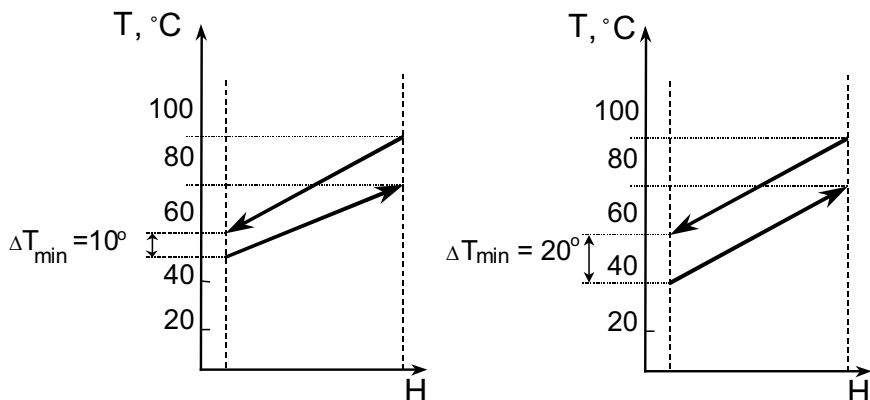


Рис. 1.5. Энтальпийные диаграммы двух противоточных теплообменников

Когда речь идет о «сбалансированном противоточном теплообменнике», имеют в виду, что тепло, потребляемая холодным потоком и тепло, отдаваемая горячим, равны по величине (рис. 1.6).

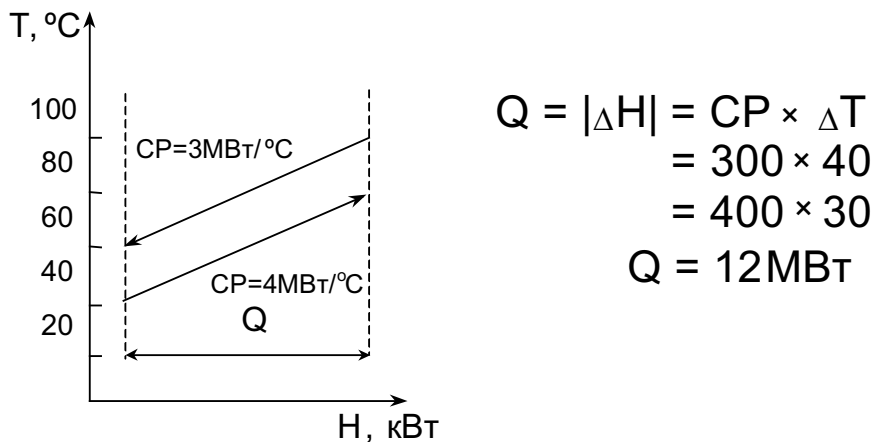


Рис. 1.6. Энтальпийная диаграмма для «сбалансированного» теплообменника

1.1 Энтальпийные диаграммы тепловых потоков

Задав значение $\Delta T_{\min}$, мы можем определить сколько тепла нужно добавить в систему. Те части тепловых потоков на энтальпийной диаграмме, которые перекрываются, показывают, сколько тепла можно рекуперировать, иными словами, какое количество холодного потока можно нагреть с помощью горячего, и какое количество горячего потока можно охладить при помощи холодного. Те отрезки, которые не перекрываются, показывают какое количество энергии нужно подвести извне или отвести вовне, чтобы требуемый теплообмен состоялся при заданной $\Delta T_{\min}$.

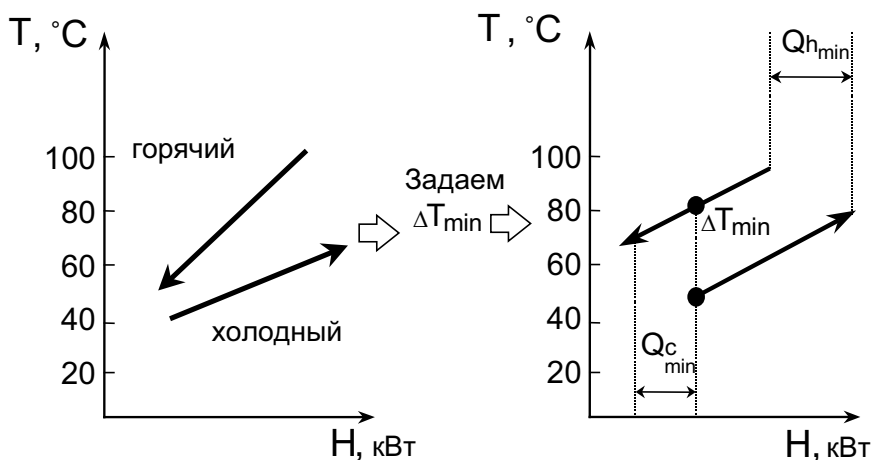


Рис. 1.7. Преобразование (параллельное смещение) энтальпийной диаграммы для двух технологических потоков системы

В большинстве реальных технологических систем существует не по одному горячему и одному холодному технологическому потоку, а множество горячих и холодных потоков. Нам необходимо понять, как их следует учитывать. Рассмотрим случай, когда в системе несколько горячих и холодных потоков (рис. 1.8).

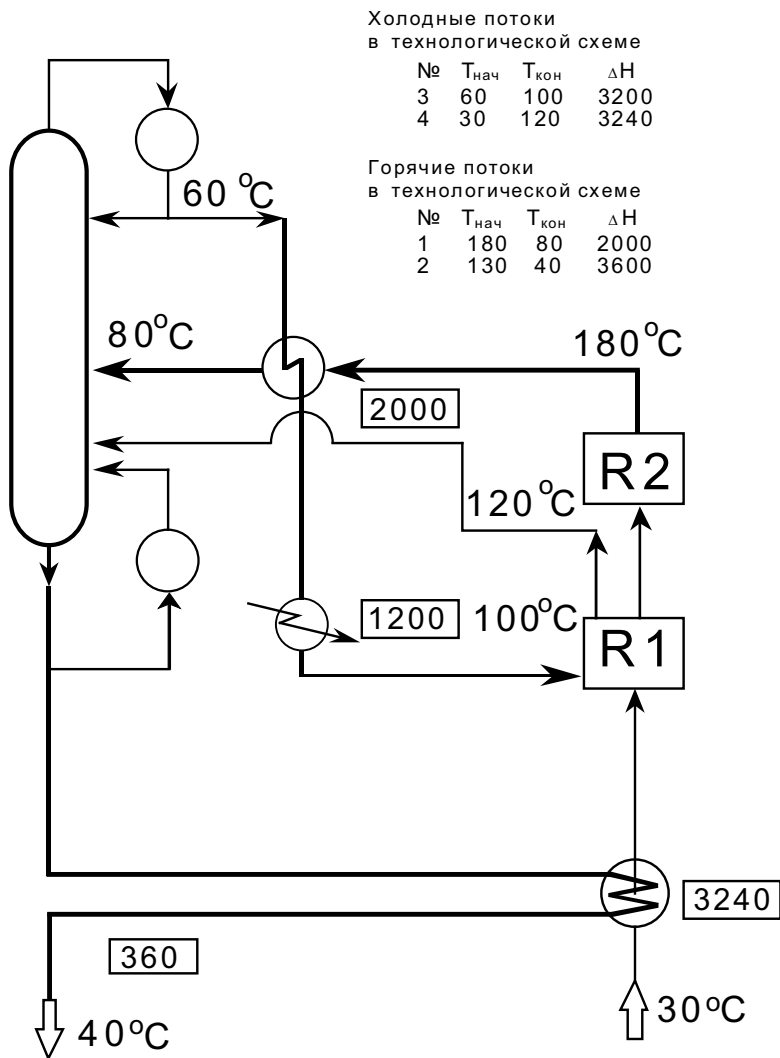


Рис. 1.8. Технологическая схема процесса с множеством горячих и холодных технологических потоков.

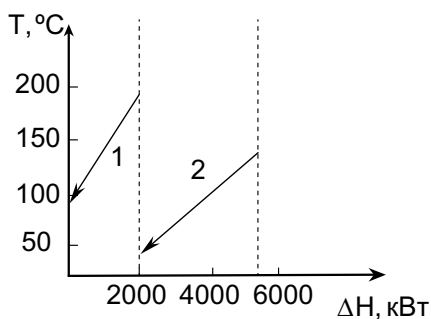
1.1. Регулярные шаровые укладки

Покажем горячие и холодные потоки на энтальпийной диаграмме в системе координат Н-Т (рис. 1.9).

Мы подошли к одному из ключевых понятий в области рекуперации, объединения, или интеграции теплоты, – к понятию «составных кривых» (“composite curves”).

а) Горячие потоки

№	$T_{нач}, ^\circ\text{C}$	$T_{кон}, ^\circ\text{C}$	ΔH
1	180	80	2000
2	130	40	3600



б) Холодные потоки

№	$T_{нач}, ^\circ\text{C}$	$T_{кон}, ^\circ\text{C}$	ΔH
3	60	100	3200
4	30	120	3240

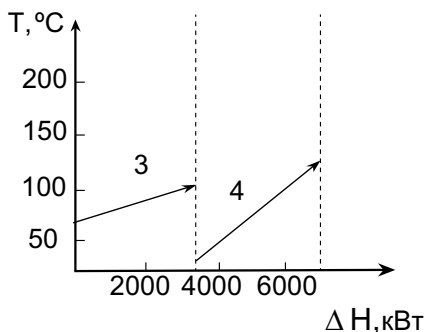


Рис. 1.9. Энтальпийная диаграмма всех горячих (а) и холодных (б) потоков

1.2 Составные тепловые кривые технологических потоков

Для того чтобы скомбинировать два горячих потока в одной технологической схеме нужно сначала их T_n и T_k расположить в порядке убывания значений данных температур (рис. 1.10). Таким образом, получаем температурные интервалы на энтальпийной диаграмме горячих потоков (в данном случае 3 интервала). После этого вычерчиваются потоки от соответствующей T_n до T_k с наклоном равным $1/CP$, чтобы отобразить соответствующее изменение энтальпии (где CP – водяной эквивалент для потока). В первом интервале существует только 1 поток ($CP=40$). На втором интервале этот поток комбинируется с другим горячим потоком, и CP становится равным 60. Аналогичная процедура осуществляется для остальных температурных интервалов. Результирующая кривая называется горячей составной кривой (СТК) потоков технологической системы.

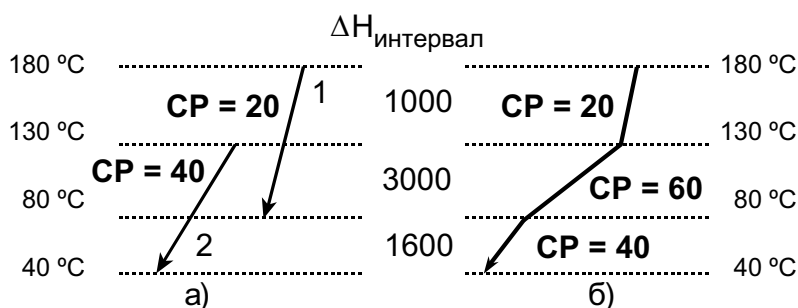


Рис. 1.10. Отдельные горячие тепловые потоки (а) и горячая составная кривая (б) для двух потоков в технологической системе

Аналогично получается холодная составная кривая технологической системы путем комбинирования холодных потоков (рис. 1.11).

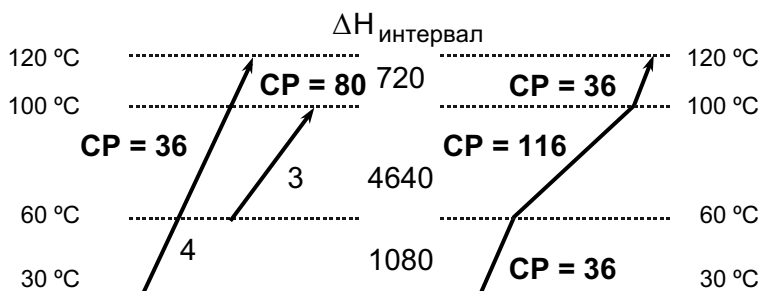


Рис. 1.11. Отдельные холодные тепловые потоки и холодная составная кривая потоков технологической системы

1.2 Составные тепловые кривые технологических потоков

Объединяя горячую и холодную составные кривые на одном графике, мы сводим всю задачу к анализу энтальпий «одного горячего потока» и «одного холодного потока» системы. Передвигая параллельно и горизонтально эти составные кривые (горячую и холодную) одну над другой мы получили минимальный температурный интервал (рис. 1.12).

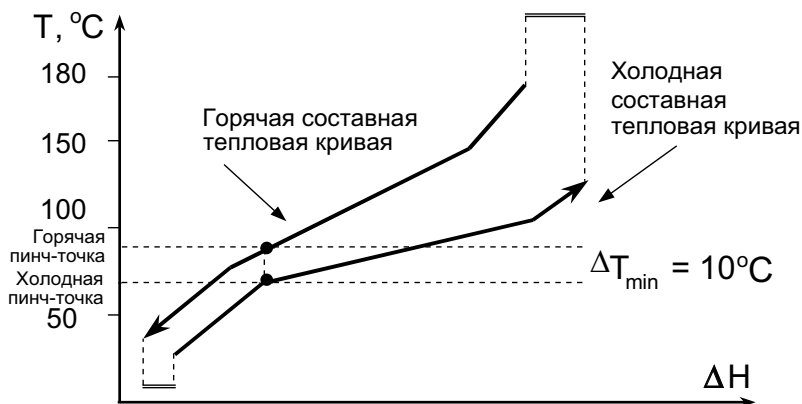


Рис. 1.12. Горячая и холодная составные кривые технологической системы

Для рассматриваемого примера после построения составных кривых и их параллельного переноса мы определяем величину $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ и потребность технологической системы в горячей утилите равна 960 ед. (на пример, кВт, МВт и т.д.) (рис. 1.13).

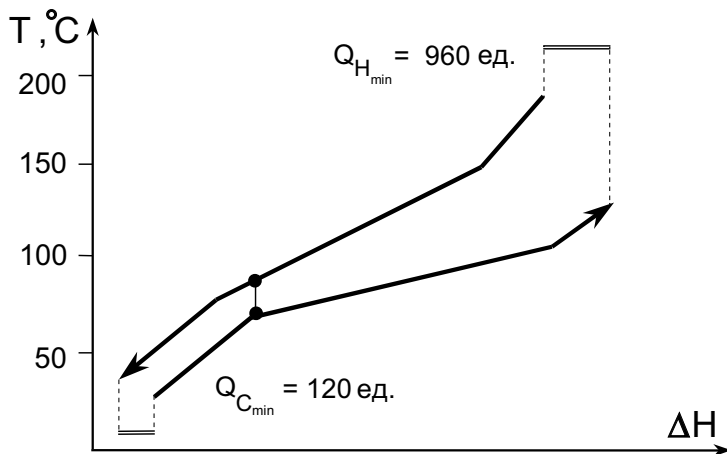
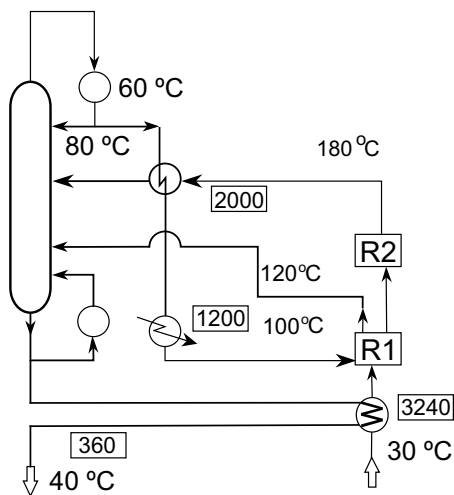
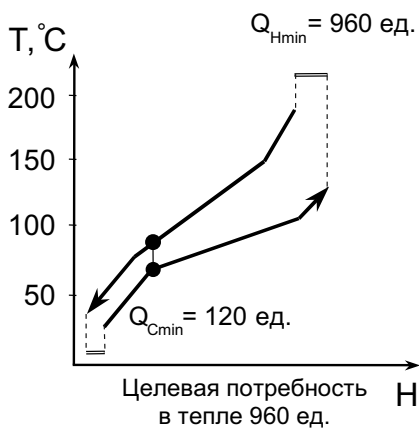


Рис. 1.13. Целевые значения внешних энергоресурсов (энергоресурсов, энергоносителей) для технологической схемы



Потребляет 1200 ед.

а)



б)

Рис. 1.14. Применение составных кривых для определения целевых значений рекуперлируемой энергии в технологической схеме:

- а) – вариант некоторой технологической схемы, синтезированной без применения составных кривых,
- б) – возможность получить лучшее решение с использованием составных кривых

ГЛАВА II

ПИНЧ-МЕТОД

2.1 Сущность пинч-метода

Метод минимальных температурных интервалов, или пинч-метод, позволяет определять минимальную движущую силу процессов теплообмена между холодными и горячими потоками в технологической системе; декомпозировать технологическую систему на подсистемы: подсистему, использующую внешние энергоисточники – горячие утилиты, и подсистему, использующую внешние энергопотребители – холодные утилиты; определять величину целевого значения рекуперации в технологической системе; выбирать рациональный экономический компромисс между величиной энергозатрат и капитальных затрат при проектировании энергосберегающих технологических схем (рис. 2.1).

По мере сближения составных кривых количество возможного рекупируемого тепла в системе увеличивается (т. к. область перекрыwania кривых становится больше), а значения теплоты подводимого внешним энергоисточником – горячей утилитой $Q_{h\min}$ и отводимого хладоносителем – холодной утилитой $Q_{c\min}$ уменьшаются. И наоборот, по мере отдаления составных кривых количество рекупируемого тепла уменьшается, а $Q_{h\min}$ и $Q_{c\min}$ увеличиваются. Выбор правильного значения $\Delta T_{\min}$ основывается на экономическом компромиссе между капитальными затратами и количеством рекупируемой теплоты.

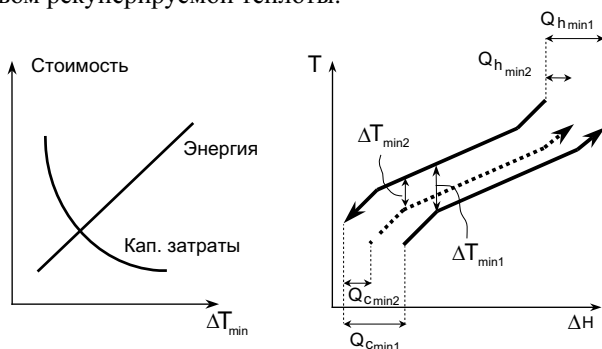


Рис. 2.1. Применение составных кривых для определения движущей силы процессов теплообмена в технологической системе

Предположив, что нам уже известно значение $\Delta T_{\min}$, мы можем зафиксировать относительное положение составных кривых и, следовательно, определить значения целевых показателей энергии для технологической системы в целом. Покажем, как это можно сделать.

При помощи параллельного смещения составных кривых на энтальпийной диаграмме «Н–Т» можно определить оптимальную движущую силу $\Delta T_{\min}$, а, следовательно, определить целевые показатели рекуперлируемой теплоты для технологической схемы.

По мере сближения составных кривых на энтальпийной диаграмме они соприкасаются в одной точке. Эта точка называется пинч-точкой или пинчем (от английского слова pinch – сжатие, сужение, щипок). В пинч-точке движущая сила процесса теплообмена между горячими и холодными потоками в технологической схеме равна 0 и, следовательно, не может быть уменьшена. Хотя практически это не имеет смысла, она задает абсолютное ограничение для рекуперации энергии в технологической системе (рис.2.2).

На практике минимальная разность температур в пинч-точке не равна 0, но тем не менее возможность рекуперации тепла все равно определяется пинч-точкой (рис. 2.3).

Поскольку эта точка показывает минимальную разность температур в системе, то, очевидно, отдельные теплообменные аппараты должны иметь разность температур не меньше чем $\Delta T_{\min}$. Поэтому при проектировании теплообменной системы в технологической схеме исходной предпосылкой является предположение о том, что ни в одном теплообменнике не может быть разность температур меньше, чем $\Delta T_{\min}$ между составными кривыми технологической схемы в целом.

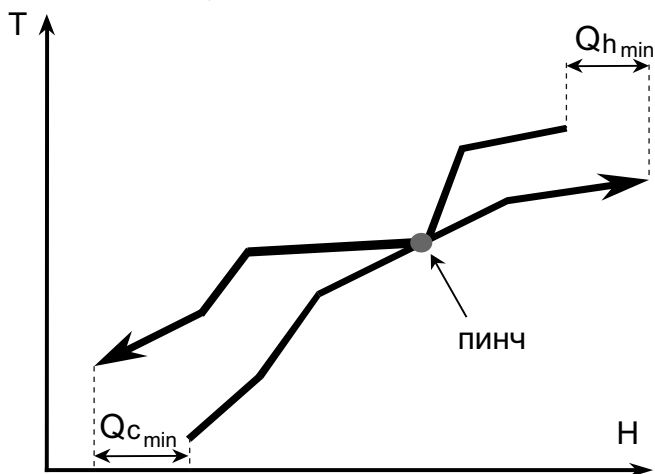


Рис. 2.2. Положение пинч-точки (пинча) задает абсолютную границу для значения рекуперлируемой теплоты в технологической системе

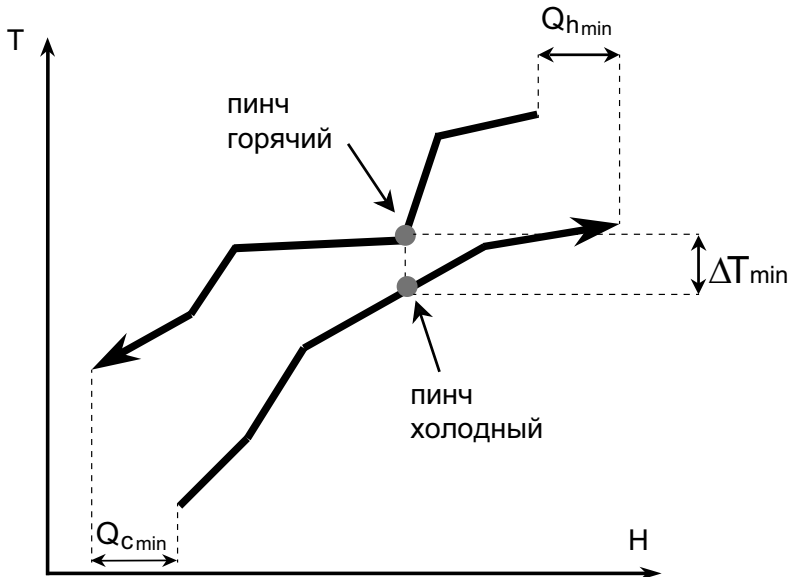


Рис. 2.3. Определение с помощью составных кривых реальной минимальной разности температур для процессов теплообмена в технологической системе

Следует отметить, что пинч возникает всегда на изгибе составной кривой, то есть он всегда находится на границе температурного интервала, там, где начинается или заканчивается тепловой поток.

2.2 Эвристические правила проектирования оптимальных энергосберегающих ХТС на основе пинч-метода

Можно заметить, что пинч-точка, делит технологическую систему на две подсистемы (или две области). Область, лежащая ниже пинча, соответствует такой подсистеме, в которой тепло, потребляемое холодными потоками, полностью обеспечивается горячими потоками данной технологической схемы. Остающееся тепло горячих потоков отводится при помощи холодной утилиты, например, охлаждающей воды.

Это значит, что область под пинчем является источником тепла. Баланс здесь поддерживается при помощи холодной утилиты, которая отводит

$Q_{c\min}$ тепла; дополнительный горячий энергоисточник (горячую утилиту) в эту область технологической системы подводить незначем (рис. 2.4).

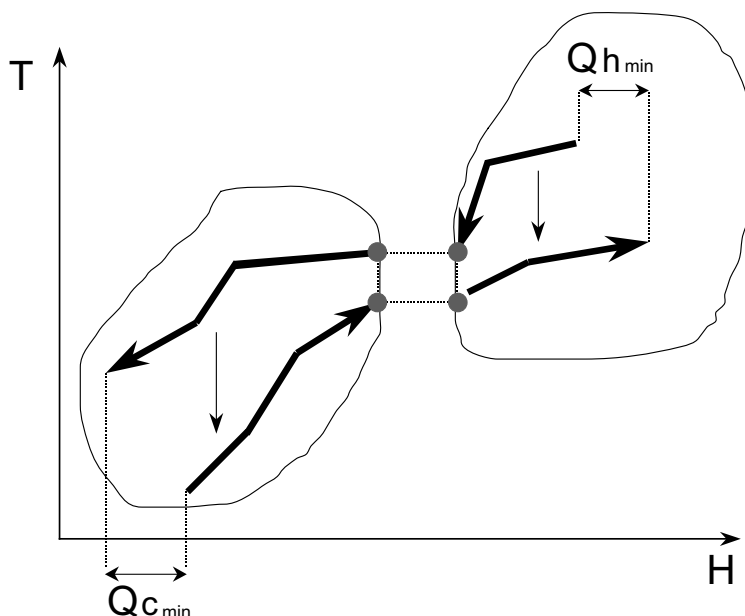


Рис.2.4. Пинч-точка на энтальпийной диаграмме декомпозирует исходную технологическую систему на две подсистемы

Обратная картина наблюдается в области выше пинча. Никакого тепла здесь не отводится. Наоборот, холодные потоки используют все тепло горячих потоков и, кроме того, дополнительное тепло от горячей утилиты (например, горячего пара) $Q_{h\min}$. Подсистема здесь ведет себя как потребитель тепла (рис. 2.4). Таким образом, тепловой баланс в этой области поддерживается при помощи горячей утилиты; дополнительного холодного энергоисточника (холодной утилиты) сюда подводить не надо.

Между горячей и холодной утилитами будет наблюдаться баланс тепла, если передача тепла через пинч-точку в технологической системе для существующих составных кривых отсутствует. Иными словами, над пинчем и под пинчем подсистемы полностью сбалансированы. Причем горячая ути-

2.2 Эвристические правила проектирования оптимальных энергосберегающих ХТС на основе пинч-метода

лита будет только в области выше пинч-точки, а холодная утилита – только в области ниже пинч-точки (рис. 2.5).

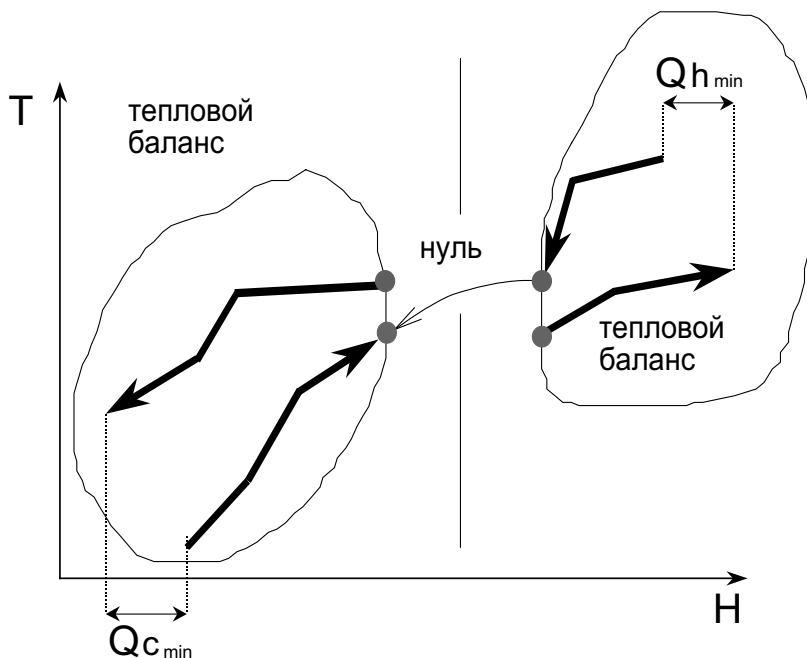


Рис. 2.5. Выбор утилит для целевого значения энергии

Рассмотрим теперь возможность передачи тепла между двумя образовавшимися подсистемами технологической схемы на основе анализа смещенных составных кривых (рис. 2.6 и рис. 2.7).

Из рисунка 2.7 видим, что передавать тепло технологической схеме от горячих потоков над пинч-точкой к холодным потокам под пинч-точкой возможно. Пусть, например, в пинч-точке температура для горячих потоков равна 170 °С, для холодных – 160 °С.

Передача тепла из области технологической системы над пинчем в область технологической системы под пинчем означает передачу тепла от горячих потоков с температурой как минимум 170 °С к холодным потокам с температурой 160 °С или ниже. На практике очень часто используют горя-

чие потоки над пинчем для нагрева холодных потоков под пинчем: движущая сила этого процесса теплопередачи положительная и больше $\Delta T_{\min}$.

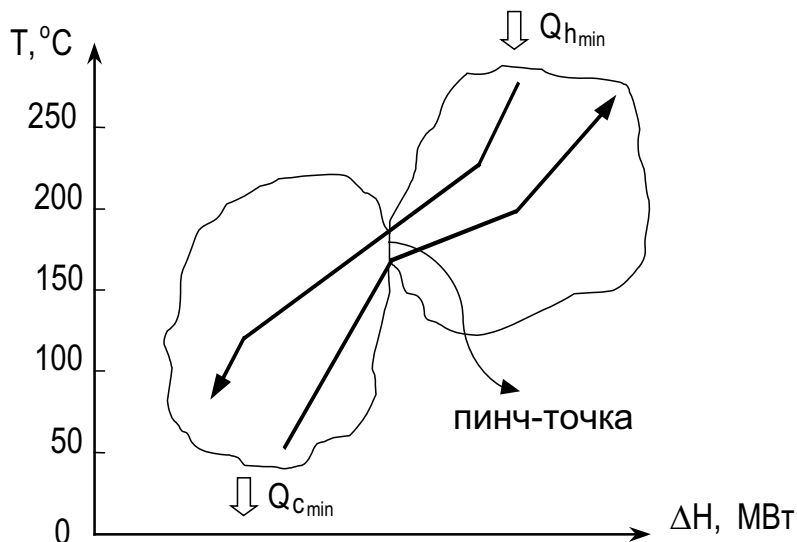


Рис. 2.6. Определение возможности передачи тепла между подсистемами технологической системы с использованием составных кривых

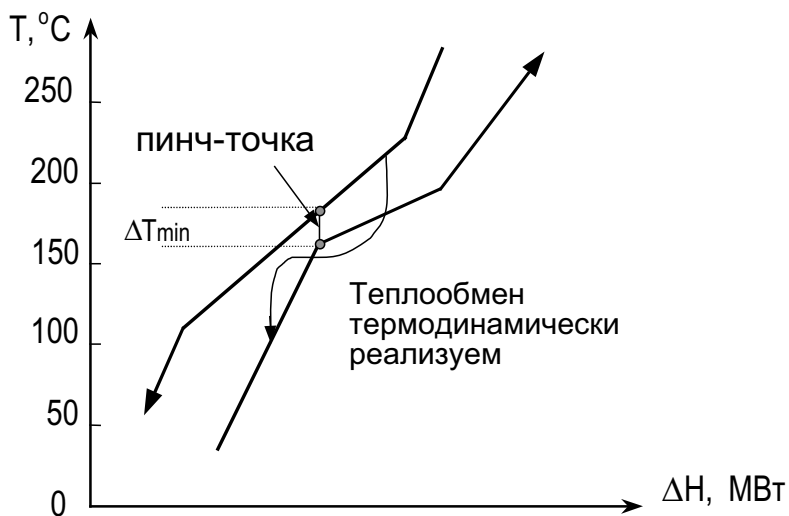


Рис. 2.7. Возможный вариант передачи тепла в технологической системе

2.2 Эвристические правила проектирования оптимальных энергосберегающих ХТС на основе пинч-метода

В противоположность этому, передача тепла от горячих потоков из области технологической системы под пинч-точкой к холодным потокам над пинч-точкой невозможна (рис. 2.8). Это потребовало бы передать тепло от горячих потоков с температурой 170 °С или ниже к холодным потокам с температурой 160 °С или выше.

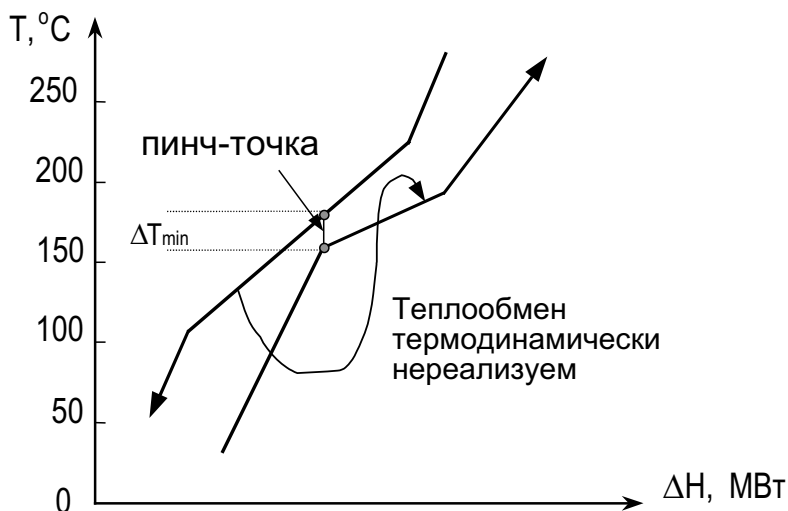


Рис. 2.8. Нереализуемый вариант передачи тепла между подсистемами технологической системы

Если мы будем передавать α единиц тепла из области над пинчем в область под пинчем, как показано на рис. (2.9), то в области над пинчем возникает дефицит тепла, его величина будет α . Единственным способом исправить это положение будет подвод извне дополнительного тепла α от горячего энергоисточника – горячей утилиты.

В области технологической системы под пинчем теперь будет избыток тепла а, поэтому его надо отводить с помощью дополнительного потока холодной утилиты (рис. 2.9).

Аналогичные эффекты вызваны неправильным использованием внешних энергоисточников в технологической системе. Утилиты нужны для того, чтобы устранить энтальпийный дисбаланс в той или иной подсистеме технологической схемы.

Итак, если в проектируемой технологической схеме α единиц тепла передается через пинч-точку, то эта система будет потреблять α единиц тепла от горячей и холодной утилит в подсистемах как над, так и под пинч-точкой.

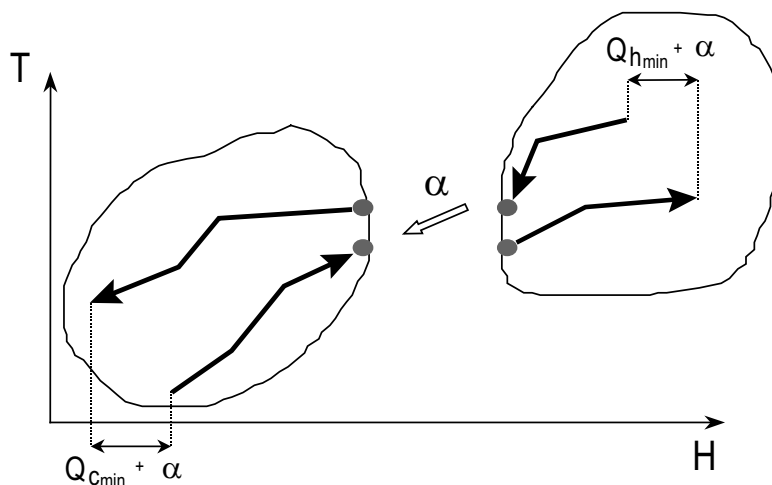


Рис. 2.9. Обоснование подвода горячей и холодной утилит в технологическую схему

На основе изложенных рассуждений об организации рационального термодинамически возможного процесса теплообмена, можно записать следующим образом уравнение для пинч-точки в целом для технологической системы:

$$\begin{array}{lcl} \text{Потребность} & = & \text{Целевое} \\ \text{системы} & & \text{значение} \\ \text{в энергии} & & \text{энергии} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Тепло,} \\ \text{передаваемое} \\ \text{через пинч} \end{array}$$

или

$$A = T + \alpha$$

Таким образом, все три типа теплопередачи в технологической системе (рис. 2.10) требуют дополнительных энергоносителей.

При оптимальном проектировании энергосберегающей технологической системы нельзя ни в коем случае передавать тепло через пинч-точку на составной кривой.

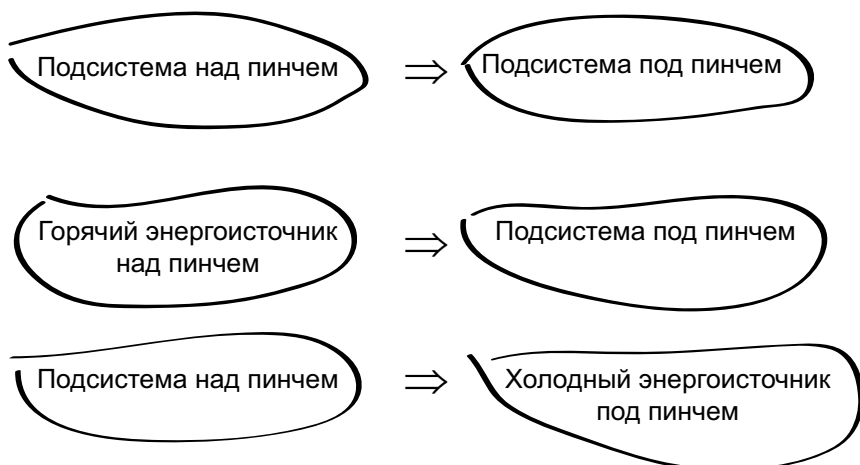


Рис. 2.10. Три типа теплопередачи в технологической системе

Приведем основные эвристические правила проектирования технологических систем с максимальной рекуперацией энергии на основе использования пинч-метода.

Правила проектирования энергосберегающих технологических систем

- Не передавать тепло через пинч-точку
- Не использовать горячую утилиту под пинчем
- Не рекуперировать тепло технологической системы через пинч-точку
- Не использовать холодную утилиту над пинчем

При использовании составных кривых и пинч-метода нужно выделить в технологической системе подсистему над и подсистему под пинч-точкой. Это обеспечит использование горячей утилиты только над пинчем, а холодной утилиты под пинчем, т. е. там где они и требуются.

При использовании составных кривых указанные выше эвристические правила могут быть сформулированы также следующим образом:

- Горячая утилита – энергоисточник (под пинчем) и холодная утилита – энергопотребитель (над пинчем) должны быть разделены
- Горячую утилиту использовать в подсистеме над пинчем, а холодную утилиту в области под пинчем
-

Графически это можно проиллюстрировать так, как показано на (рис. 2.11).

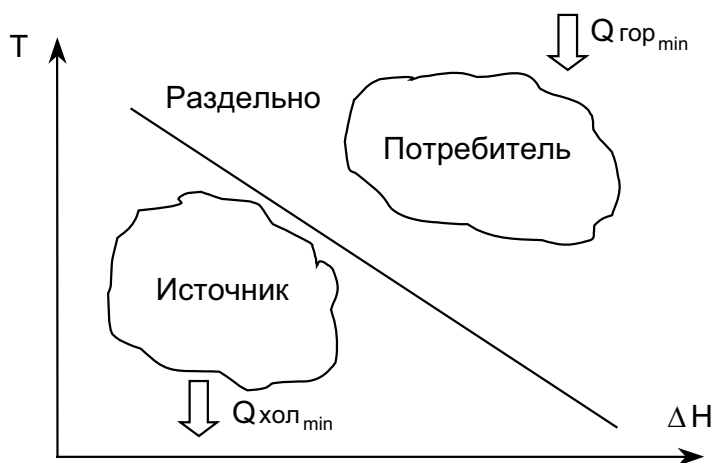


Рис. 2.11. Графическая иллюстрация основного эвристического правила проектирования оптимальных энергосберегающих технологических схем

Если ранее применялись методы проектирования систем теплообменников и систем утилит (пароснабжения и охлаждения), которые требовали постоянного расчета и отслеживания количества потребляемой энергии в технологической схеме, то при помощи пинч-метода мы априори определяем минимально возможное потребление энергии в системе – т. е. априори определяем оптимальные целевые значения рекуперлируемой в системе энергии.

На приведенных выше примерах мы могли наблюдать, как очевидны и просты указанные правила. Однако если мы проанализируем реальные технологические схемы действующих производств, то с уверенностью можно сказать, что в большинстве случаев эти правила в той или иной степени оказываются нарушенными. Поэтому данные правила предоставляют очень ценные указания для повышения эффективности функционирования промышленных технологических схем. Достаточно устранить нарушения базовых правил пинч-метода и экономия энергетических ресурсов гарантирована. Это доказано на многих тысячах реальных производств во всем мире.

ГЛАВА III

ТАБЛИЧНЫЙ АЛГОРИТМ И СЕТОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ

3.1 Табличный алгоритм определения целевых значений рекуперированной в ХТС энергии

Процедура непосредственного определения целевых значений рекуперированной в технологической системе энергии на основе геометрических преобразований составных кривых весьма трудоёмка. Для численного решения этой задачи был разработан табличный алгоритм. С использованием составных кривых разобьем диапазон температур потоков технологической системы на температурные интервалы (рис. 3.1) так, как это делалось для построения составных кривых.

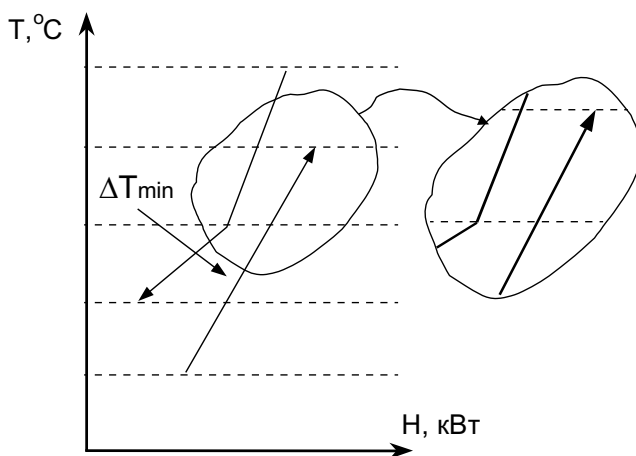


Рис. 3.1. Определение температурных интервалов

Из рис. 3.1 видно, что невозможно рекуперировать все тепло на каждом температурном интервале, поскольку температурные движущие силы не постоянны на всем интервале. Эту проблему можно преодолеть, если, принять

допущение, что горячая составная кривая на $\Delta T_{\min}/2$ холоднее, чем на самом деле (рис. 3.2), а холодная составная кривая на $\Delta T_{\min}/2$ горячее.

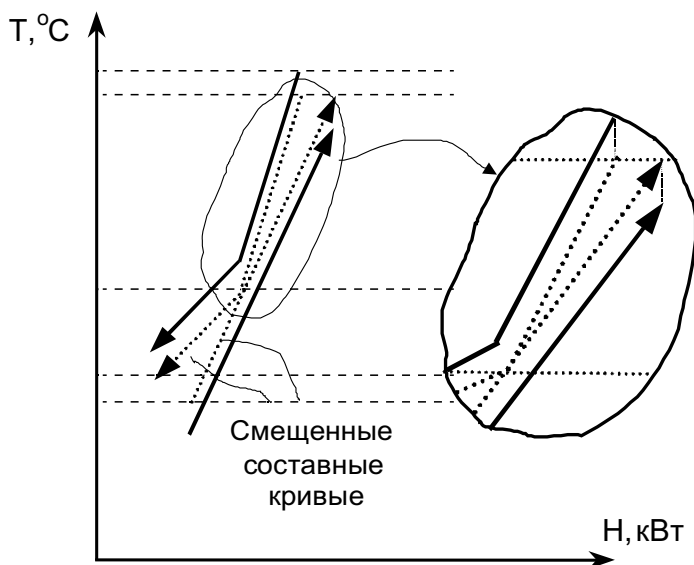


Рис. 3.2. Смещение составных кривых по температурной оси обуславливает полную рекуперацию внутри температурных интервалов

Смещенные составные кривые теперь соприкасаются в пинч-точке. Расчет теплового баланса между смещенными кривыми внутри смещенного температурного интервала показывает, что передача тепла возможна в каждом смещенном температурном интервале, так как горячие потоки на деле на $\Delta T_{\min}/2$ горячее, а холодные потоки на $\Delta T_{\min}/2$ холоднее. Внутри каждого смещенного интервала горячие потоки в действительности горячее холодных потоков как раз на $\Delta T_{\min}$.

Этот метод смещения составных кривых можно использовать для разработки табличного алгоритма расчета целевых значений рекуперированной энергии в технологической системе без построения составных кривых. Рассматриваемый табличный алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Задать температурные интервалы в диапазоне температур от самой горячей температуры горячей составной кривой до самой низкой температуры холодной составной кривой вычитанием $\Delta T_{\min}/2$ из температур горячих потоков и прибавлением $\Delta T_{\min}/2$ к температурам холодных потоков.

3.1 Табличный алгоритм определения целевых значений рекуперированной в ХТС энергии

2. Рассчитать для каждого смещенного температурного интервала простой энергетический баланс по формуле

$$\Delta H_i = (\sum CP_C - \sum CP_H)_i \Delta T_i \quad (3.1)$$

где ΔH_i – изменение энтальпии в технологической системе для смещенного интервала i , а ΔT_i – разность температур на интервале i ,

CP_C – потоковая теплоемкость холодного потока на i -ом интервале, CP_H – потоковая теплоемкость горячего потока на i -ом интервале.

Если $(\Delta CP_C)_i > (\Delta CP_H)_i$, то интервал имеет нетто-дефицит тепла и ΔH положительно. В противном случае температурный интервал имеет нетто-избыток тепла и ΔH отрицательно.

Это согласуется с правилами термодинамики (например, ΔH экзотермической реакции отрицательно). Если не используется горячий энергоисточник, то это эквивалентно построению смещенных составных кривых.

3. Определение величины максимального перекрытия смещенных кривых (равно теплу внешнего энергоисточника – утилиты).

Сущность третьего этапа поясняет рис. 3.3.

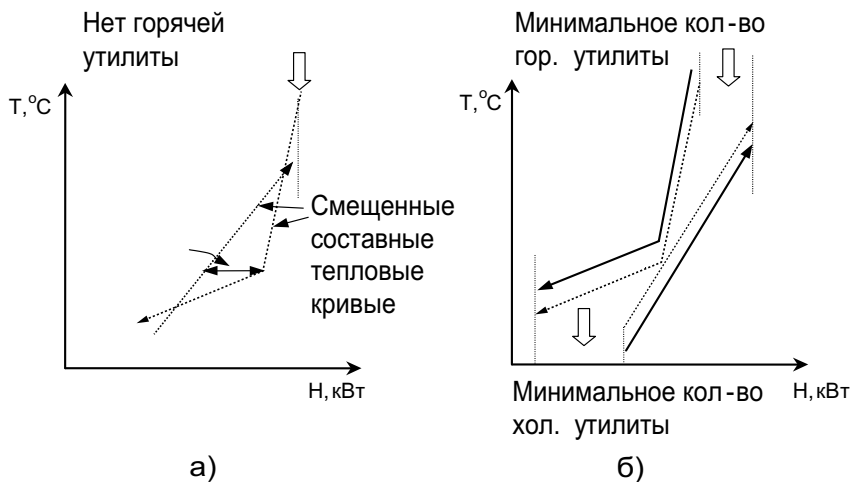


Рис. 3.3. Пояснение максимального перекрытия смещенных составных кривых, которое равно теплу внешнего энергоисточника

Для случая перекрытия смещенных кривых, представленного на рис. 3.3 (а), теплопередача в технологической системе не возможна. В некоторой точке это перекрытие достигает своего максимума. С тем чтобы ликвидировать указанное максимальное перекрытие в систему вводится дополнительный энергоисточник с энтальпией, равной величине этого максимального перекрытия. Смещенные кривые теперь касаются в пинч-точке, как показано на рис. 3.3 (б). Поскольку смещенные составные кривые лишь касаются, реальные кривые отдалены друг от друга на расстоянии $\Delta T_{\min}$ в этой точке.

Рассмотрим пример использования табличного алгоритма.

На рис. 3.4 приведена технологическая схема производства продуктов 1 и 2 из двух видов сырья. Эта схема включает в себя два реактора и колонну разделения. На рис. 3.4 показаны также значения температур и энтальпий.

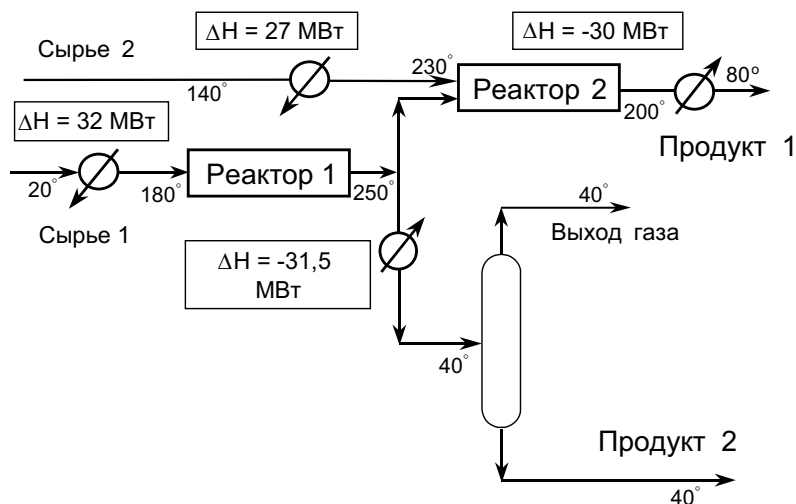


Рис. 3.4. Технологическая схема для выбора целевых значений рекуперированной энергии

Во-первых, зная самую горячую температуру горячей составной кривой и самую низкую температуру холодной составной кривой, определим смещенные температурные интервалы T^* . Горячие потоки сдвигаются вниз по температурной оси на $\Delta T_{\min}/2$, а холодные потоки сдвигаются вверх на $\Delta T_{\min}/2$, как показано в таблице 3.1.

Множество потоков технологической схемы показано на рис. 3.5 на вертикальной температурной шкале. На рисунке также представлены интер-

3.1 Табличный алгоритм определения целевых значений рекуперированной в ХТС энергии

вальные температуры, которые заданы на $\Delta T_{\min}/2$ ниже температур горячих потоков и на $\Delta T_{\min}/2$ выше температур холодных потоков.

Таблица 3.1.

Характеристики горячих и холодных технологических потоков

Поток	Тип	T_H	T_K	T^*_H	T^*_K
1	Холодный	20	180	25	185
2	Горячий	250	40	245	35
3	Холодный	140	230	145	235
4	Горячий	200	802	195	75

$$\Delta T_{\min} = 10.$$

Далее рассчитываем баланс внутри каждого смещенного температурного интервала по уравнению (3.1). Результаты расчета баланса приведены на рис. 3.6. В некоторых смещенных температурных интервалах, наблюдается избыток тепла, в других – его дефицит.

Тепловой баланс внутри каждого смещенного температурного интервала позволяет максимально рекуперировать тепло внутри данного интервала. Однако, нужно также допустить возможность рекуперации тепла между различными интервалами.

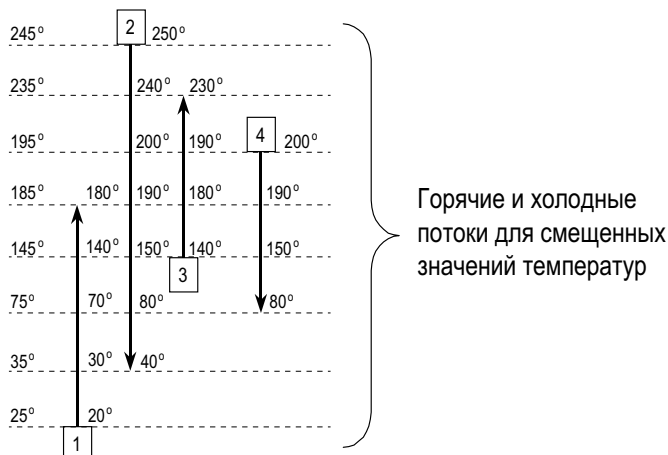


Рис. 3.5. Представление множества вновь образованных горячих и холодных потоков в технологической схеме на вертикальной температурной шкале



Рис. 3.6. Вертикальная температурная шкала и результаты расчета тепловых балансов внутри температурных интервалов

Теперь направим вниз по температурной шкале любой избыток тепла от интервала к интервалу, при этом образуется теплообмен между потоками. Это представляется возможным, так как любой избыток тепла в горячих потоках на данном интервале достаточно велик, чтобы ликвидировать дефицит тепла в холодных потоках на следующем за ним нижнем температурном интервале. На рис. 3.7 показан тепловой каскад для данного примера.

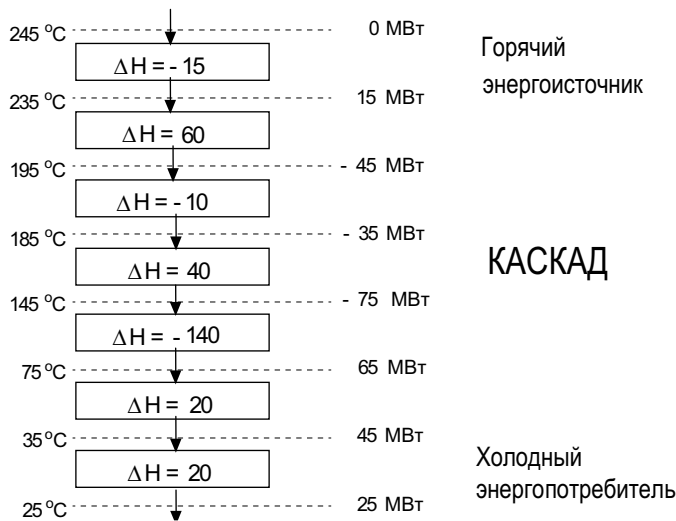


Рис. 3.7. Построение теплового каскада на вертикальной температурной шкале

3.1 Табличный алгоритм определения целевых значений рекуперированной в ХТС энергии

Во-первых, предположим, что на первый интервал не поступает никакого тепла от горячего энергоисточника. На первом интервале существует избыток в 15 МВт, который направляется каскадом вниз на следующий интервал. На этом втором интервале существует дефицит в 6 МВт, который уменьшает тепло, направляемое каскадом вниз от этого интервала, до – 45 МВт. В третьем интервале у технологической системы избыток тепла в 10 МВт, что приводит к тому, что на следующий интервал вниз направляется – 35 МВт и т. д.

Посмотрим еще раз на тепловые потоки на рис. 3.8 (а). Некоторые из них отрицательные, что невозможно. Тепло нельзя передавать вверх по температурной шкале. Чтобы сделать возможным каскад теплообмена, нужно добавить достаточное количество тепла от горячего энергоисточника (горячей утилиты), с тем чтобы сделать тепловые потоки, по крайней мере, равными нулю. Минимальное количество требуемого тепла горячей утилиты – это самое большое (по модулю) отрицательное значение теплового потока т. е. 75 МВт. На рис. 3.8 (б) мы добавляем 75 МВт к первому интервалу от горячего энергоисточника. Это не меняет тепловой баланс внутри каждого температурного интервала, но увеличивает значения тепловых потоков между интервалами на 75 МВт и приводит к тому, что у одного потока величина оказывается равной 0 на температурном интервале 145 °С.

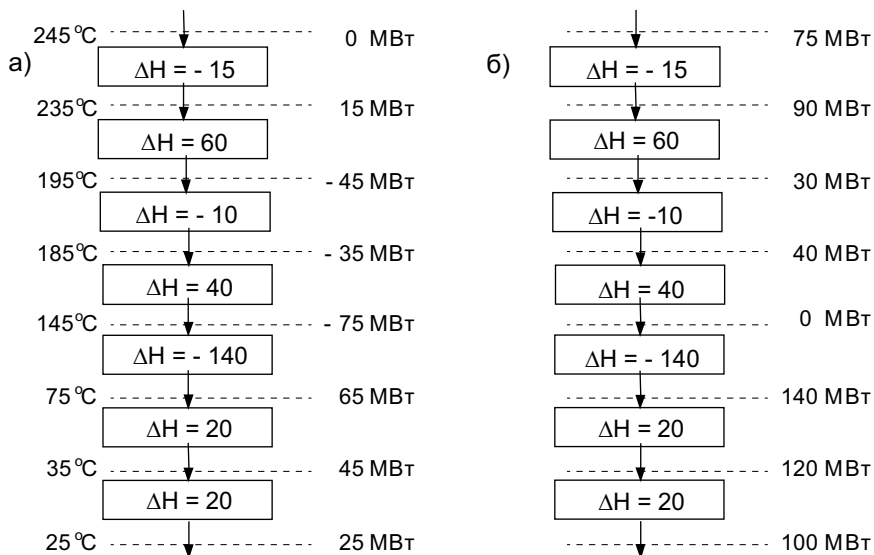


Рис. 3.8 Тепловые каскады на вертикальной температурной шкале

Можно добавить больше 75 МВт на первый интервал от горячего энергоисточника, но нашей целью является определение минимальных величин Q горячего и холодного энергоисточников. Таким образом, как следует из рисунка, $Q_{h\min}=75$ МВт и $Q_{c\min}=100$ МВт. Это соответствует данным, полученным при построении составных кривых на рис. 3.8 (а). Из теплового каскада, изображенного на рис. 3.8 (б), можно получить дополнительную информацию. Точка, в которой тепловой поток равен 0 при $T^*=145^\circ\text{C}$, соответствует точке «пинч». Таким образом, реальные пинч-температуры горячего и холодного потоков – соответственно 150°C и 140°C . Этот результат соответствует результатам, полученным при построении тепловых кривых на рис. 3.8 (а).

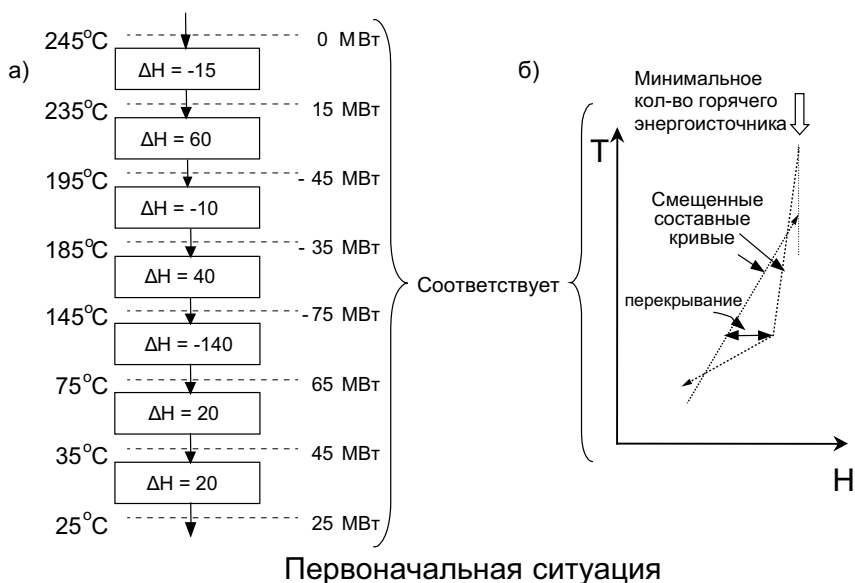


Рис. 3.9. Тепловой каскад (а) и соответствующее ему перекрытие составных кривых (б)

Первоначальная ситуация с тепловым каскадом на рисунке 3.8 (а) соответствует смещенным составным кривым на рис. 3.9 (б), где есть перекрытие.

Ситуация, при которой тепловой каскад равен нулю или положительной величине (рис. 3.8 (а)), соответствует сдвинутым составным кривым, представленным на рис. 3.10 (б).

3.1 Табличный алгоритм определения целевых значений рекупируемой в ХТС энергии

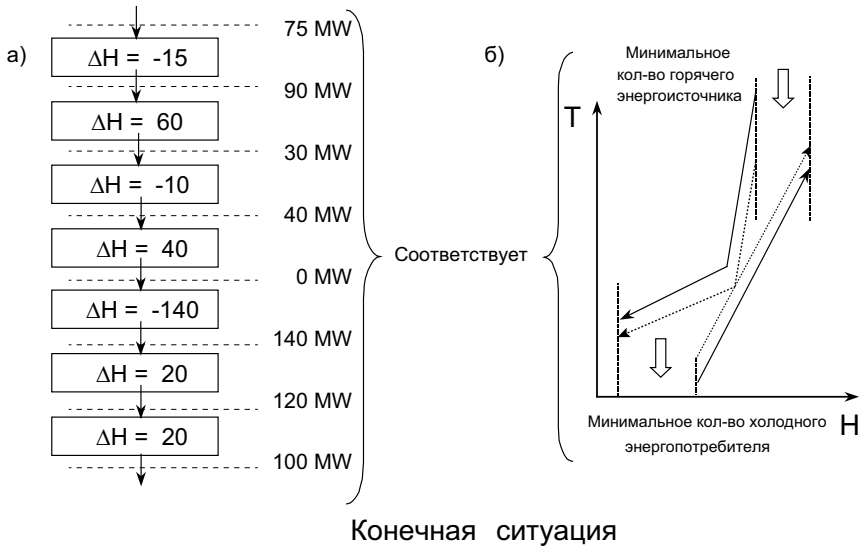


Рис. 3.10. Тепловой каскад (а) и соответствующее ему смещение составных тепловых кривых (б)

Таким образом, составные кривые полезны для концептуального понимания процесса теплообмена в технологической системе, а табличный алгоритм более удобен для расчетов.

Резюмируя, можно сказать, что оба подхода – составные кривые и табличный алгоритм – необходимые аналитические инструменты пинч-метода.

3.2 Методика построения сеточных диаграмм

На рис. 3.11 изображена технологическая схема, и именно к такому традиционному представлению технологических схем мы привыкли. Теплообменники и другие аппарата представлены соответствующими символами. Потоки изображены в виде направленных линий.

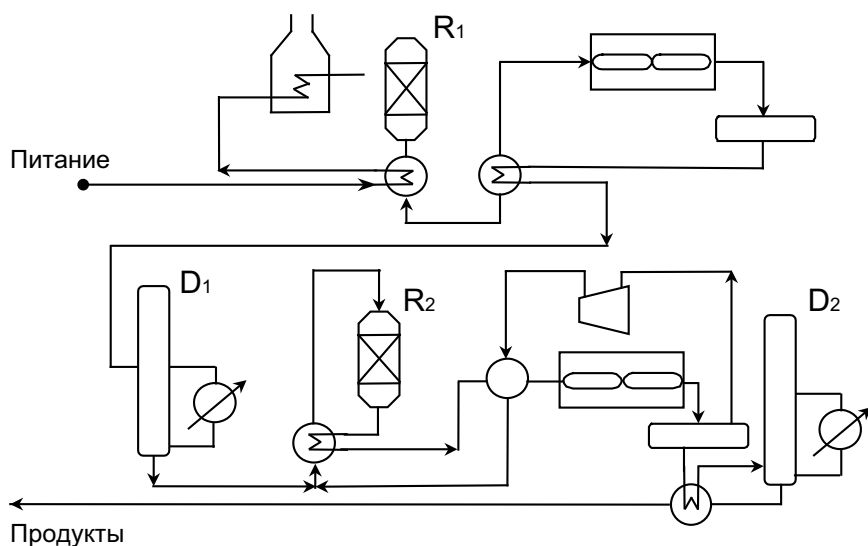


Рис. 3.11. Технологическая схема

В предыдущей главе мы говорили о том, что для эффективного проектирования системы теплообменников с использованием составных кривых нужно разделить технологическую систему на две области: выше и ниже пинча. Попробуем это сделать для рассматриваемой технологической схемы.

При традиционном представлении технологической схемы показать пинч-точку довольно сложно, так как потоки разбросаны по всей системе. Даже для не слишком большого числа потоков выявление пинча, а также областей системы выше и ниже пинча на технологической схеме становится затруднительным из-за того, что потоки перемешаны (рис. 3.12).

Поэтому более удобно для анализа способов рационального энергосбережения в системе представлять потоки и теплообменные аппараты не при помощи традиционных технологических схем, а при помощи так называемой сеточной диаграммы.

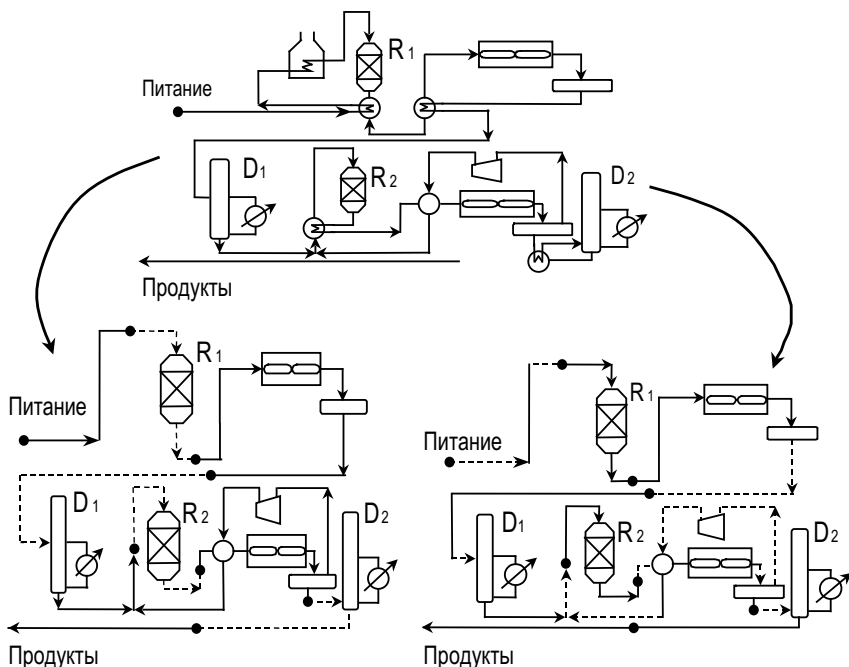


Рис. 3.12. Декомпозиция исходной технологической системы на две подсистемы: над пинчем и под пинчем

Когда мы рассматриваем в технологической схеме только потоки, связанные с нагреванием/охлаждением, и используем только один вид аппаратов – теплообменники (в т. ч. нагреватели и холодильники), мы можем использовать «сеточную диаграмму» (рис. 3.13).

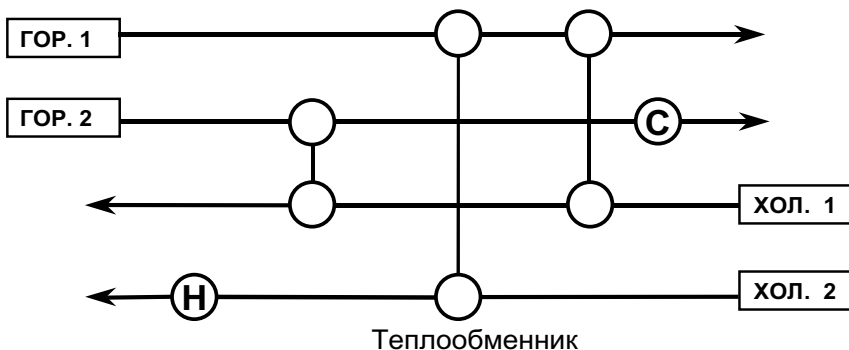


Рис. 3.13. Построение сеточной диаграммы

На сеточной диаграмме горячие потоки традиционно принято (хотя это и не обязательно) направлять слева направо в верхней части рисунка, а холодные – справа налево в нижней. Теплообменники изображаются в виде 2-х кружков на соответствующих потоках, и эти кружки соединяются линией на сеточной диаграмме. Нагреватели и охладители показаны в виде одного кружка с буквой Н (heater) или С (cooler) соответственно. Тепловая нагрузка на сеточной диаграмме записывается под изображением теплообменника.

Теперь на сеточной диаграмме нужно определить местоположение пинч-точки. На сеточной диаграмме легко показать пинч-точку в виде штриховых линий, разделяющих потоки выше и ниже пинча. Область, выше пинча оказывается в левой части диаграммы, область ниже пинча – в правой части сеточной диаграммы (рис. 3.14).

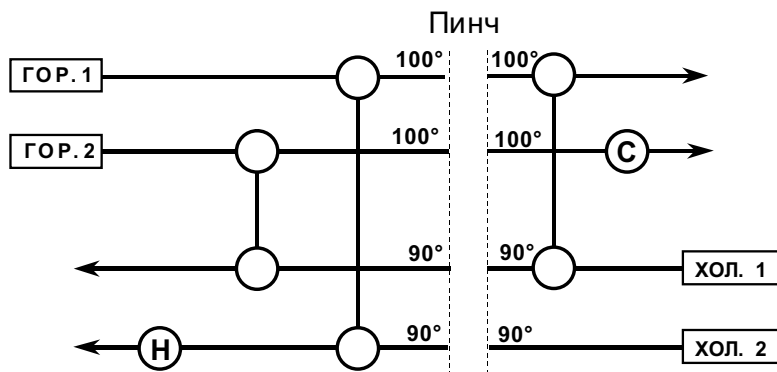


Рис. 3.14. Определение положения пинч-точки на сеточной диаграмме

Теперь на сеточной диаграмме можно легко увидеть правильную и неправильную теплопередачу через пинч-точку (рис. 3.15).

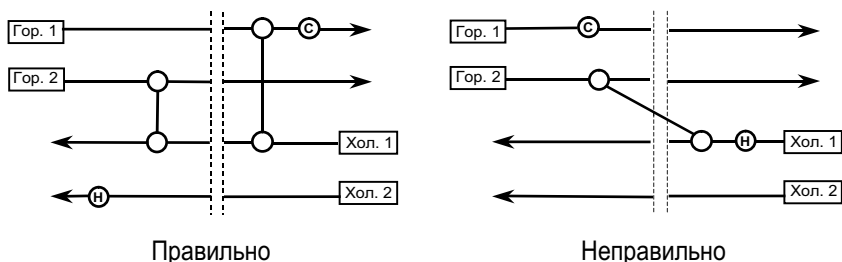


Рис. 3.15. Анализ возможности передачи тепла между подсистемами технологической схемы с помощью сеточной диаграммы

3.2 Методика построения сеточных диаграмм

Для обычных технологических схем изменение вариантов теплообмена между технологическими потоками (изменение мест теплообменников, или перенаправление потоков) делает такие схемы более запутанными (рис. 3.16).

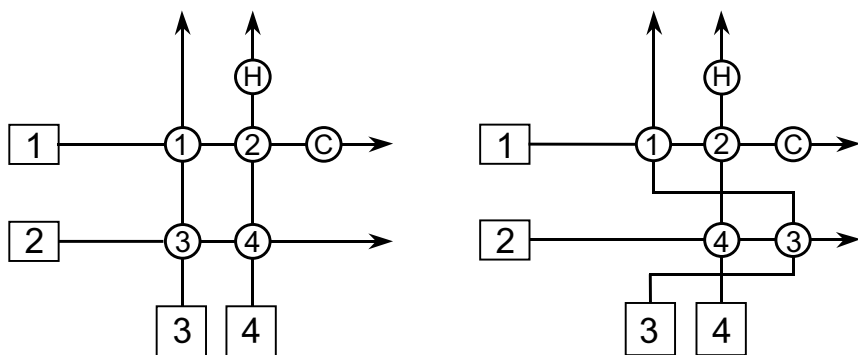


Рис. 3.16. Варианты технологических схем с измененным тепловым взаимодействием потоков

На сеточной диаграмме (рис. 3.17) очень легко перенаправлять потоки, т. е. изменять месторасположение теплообменников в технологической схеме.

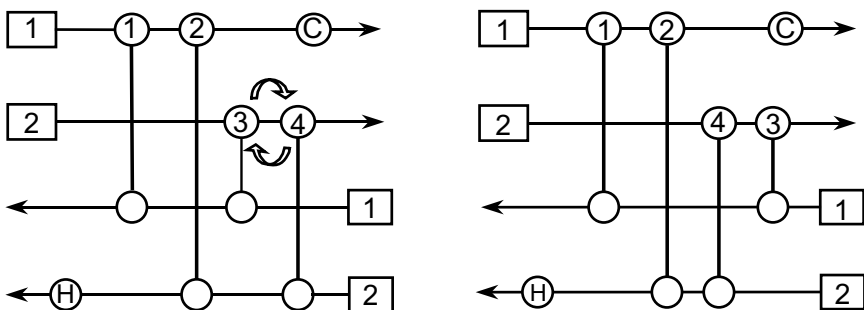


Рис. 3.17. Сеточная диаграмма при переобвязке теплообменников в технологической схеме

Кроме того, сеточная диаграмма пригодна для представления очень сложных теплообменных систем. На рис. 3.18 показана технологическая схема крупного нефтеперерабатывающего завода. Здесь 28 горячих пото-

ков, 13 холодных потоков, 30 теплообменников, 2 нагревателя, 17 холодильников. Но представление этой системы теплообменников технологической схемы в виде сеточной диаграммы вполне наглядно и удобно.

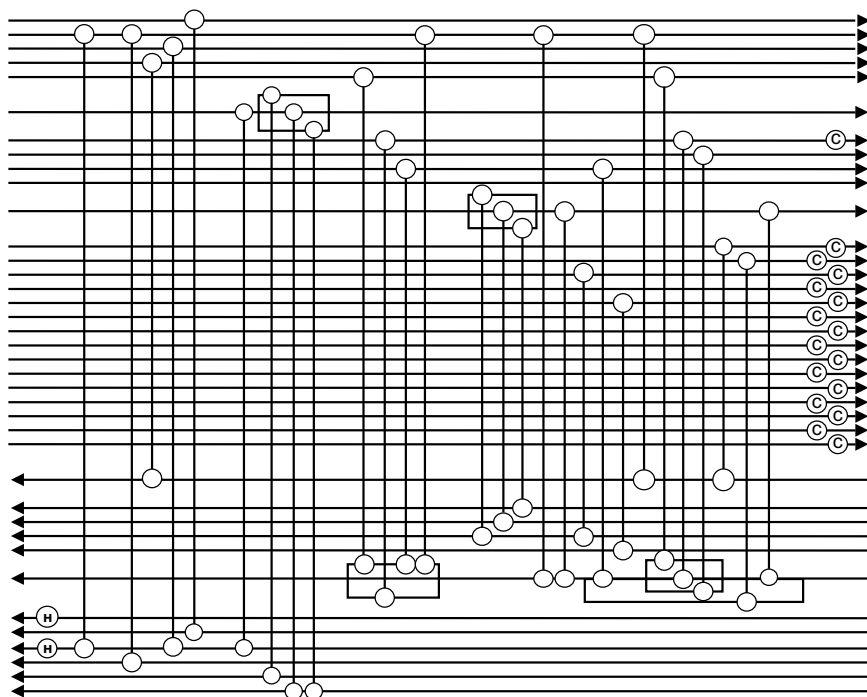


Рис. 3.18. Сеточная диаграмма сложной теплообменной системы крупного нефтеперерабатывающего предприятия

По диаграмме, приведенной на рисунке 3.18, можно без труда определить местонахождение пинч-точки, а также наличие или отсутствие передачи тепла через пинч. Эта диаграмма оказывается очень удобным представлением теплообменной системы в случае, если нам необходимо оптимизировать данную систему. Если теплообменная система, представленная в виде сеточной диаграммы, уместилась на половине обычной страницы, то для представления той же системы в виде традиционной технологической схемы, потребовался бы большой чертежный лист.

ГЛАВА IV

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ С МАКСИМАЛЬНОЙ РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

В данной главе мы рассматриваем методологию проектирования систем теплообменников (СТ) с помощью пинч-метода исключительно с точки зрения минимизации потребления энергии.

На рис. 4.1 показаны потоки технологической схемы, для который необходимо синтезировать СТ.

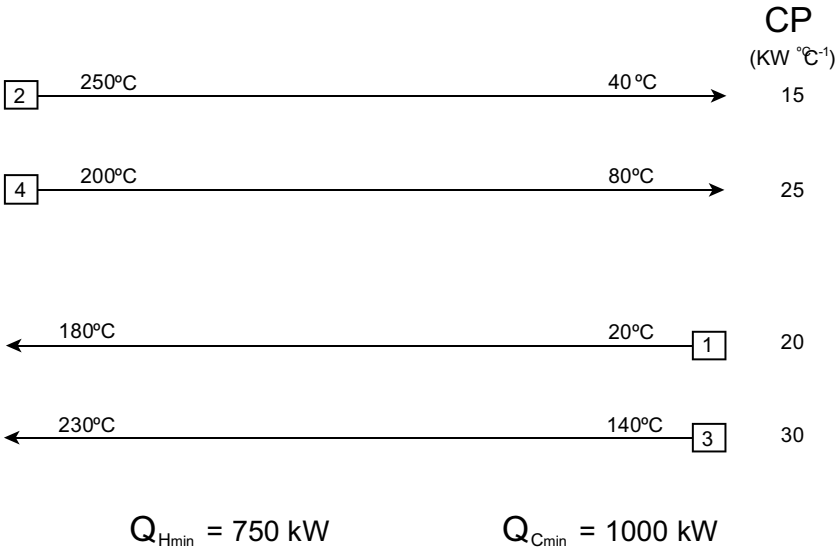


Рис. 4.1. Горячие и холодные потоки технологической схемы

Решение задачи синтеза начинается с разделения СТ на области над и под пинчем. Составные кривые для данной системы показаны на рис. 4.2.

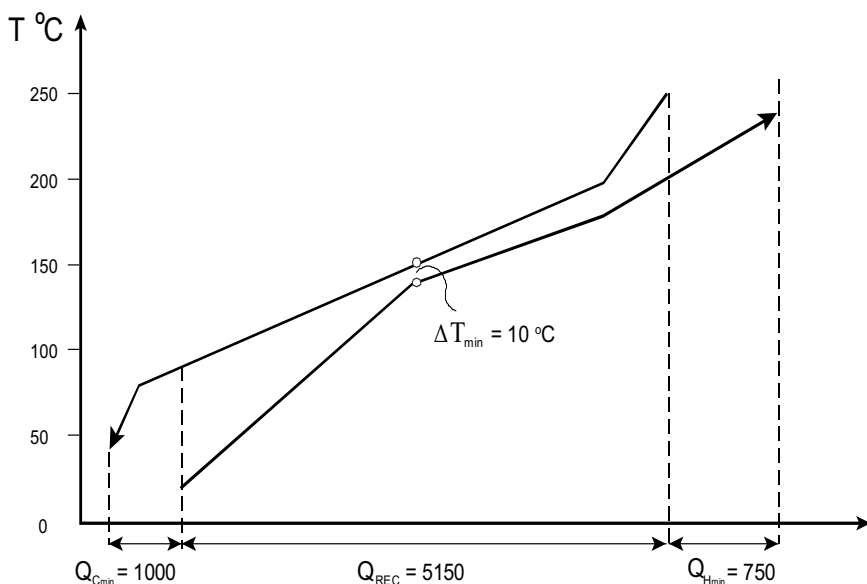


Рис. 4.2. Составные кривые технологической системы

Пинч делит потоки системы на две области, как показано на рис. 4.3.

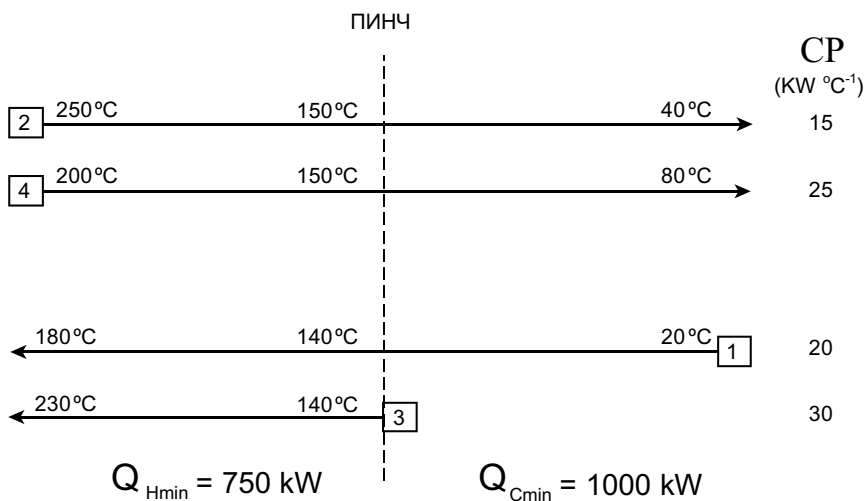


Рис. 4.3. Потоки системы, разделенные пинчем

При выборе пар потоков для объединения, следуют правилам:

- в теплообменнике не может быть разность температур меньше $\Delta T_{\min}$
- технологические потоки не могут передавать тепло через пинч
- утилиты должны размещаться только там, где им положено. Горячие утилиты должны размещаться в области над пинчем, холодные – под пинчем.

Инженерная практика подсказывает начинать синтез в каждой области СТ всегда в зоне пинч-точки, как наиболее сложной зоне из-за разностей температур, приближающихся к $\Delta T_{\min}$, и продолжать в сторону от пинча (рис. 4.4)

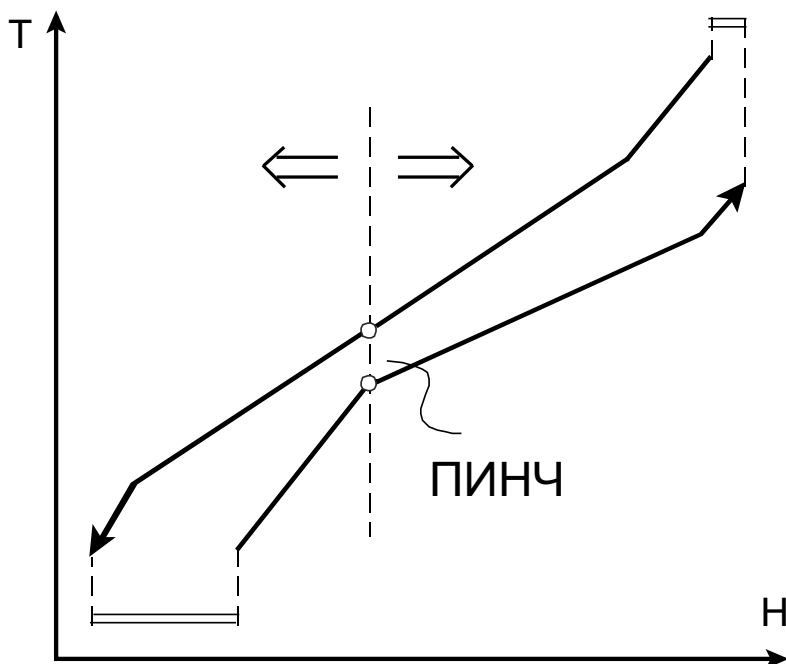
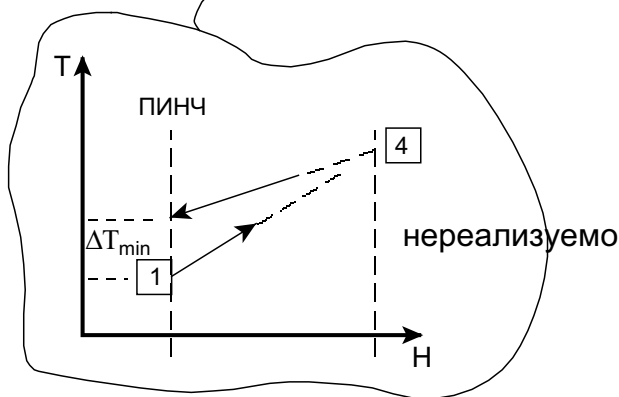
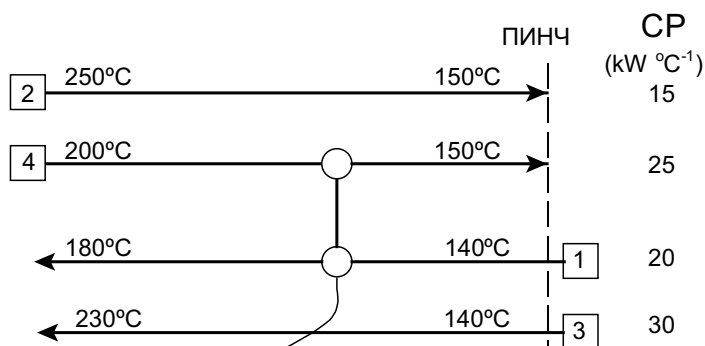


Рис. 4.4. Последовательность проектирования

На этой стадии возникает вопрос каким образом объединять потоки. Рассмотрим область над пинчем. Пусть CP горячего потока больше CP холодного потока (рис. 4.5). Вблизи пинч-точки пара потоков, указанная на рисунке уже имеет минимальную разность температур. Отдаляясь от пинча, разность температур между ними будет ещё уменьшаться, что противоречит заданной $\Delta T_{\min}$.

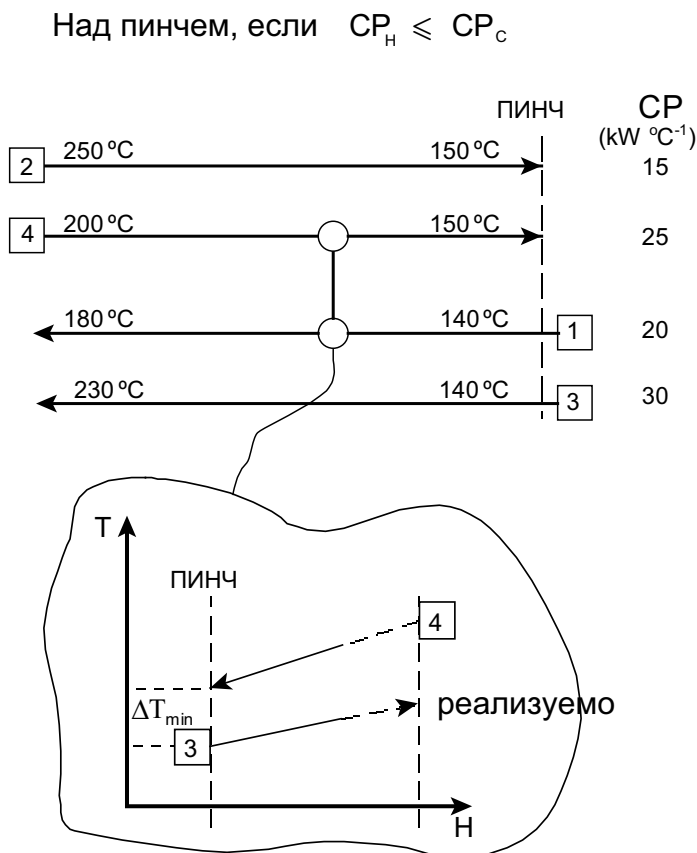
Над пинчем, если $CP_H > CP_C$



Объединение потоков нереализуемо

Рис. 4.5. Область над пинчем, $CP_{гор} > CP_{хол}$

Теперь пусть в этой же области над пинчем CP горячего потока меньше CP холодного потока (рис. 4.6). Отдаляясь от пинч-точки, разность температур между этими потоками будет увеличиваться, что вполне допустимо.

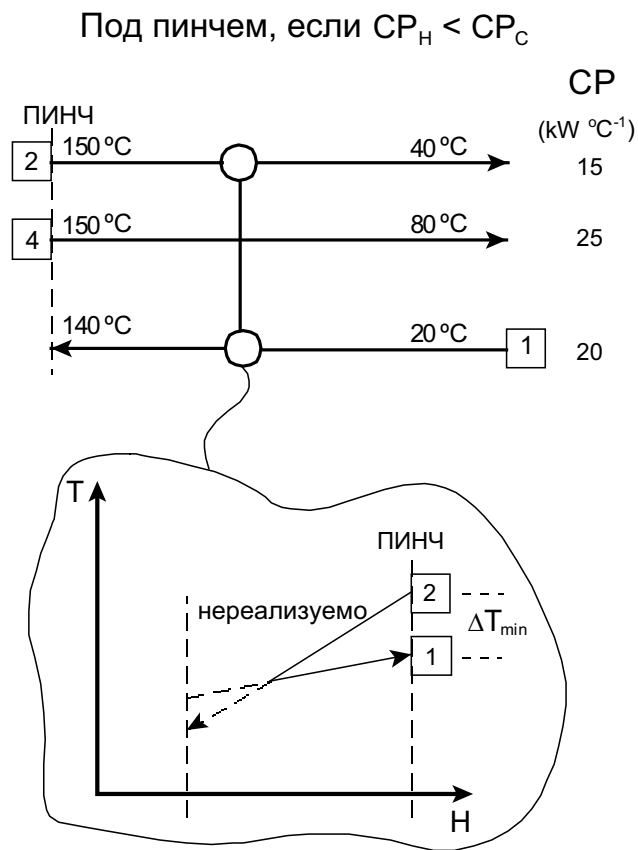


Объединение потоков реализуемо

Рис. 4.6. Область над пинчем, $CP_{гор} < CP_{хол}$

Следовательно, в области над пинчем, CP горячего потока – кандидата на объединение – должно быть меньше CP холодного.

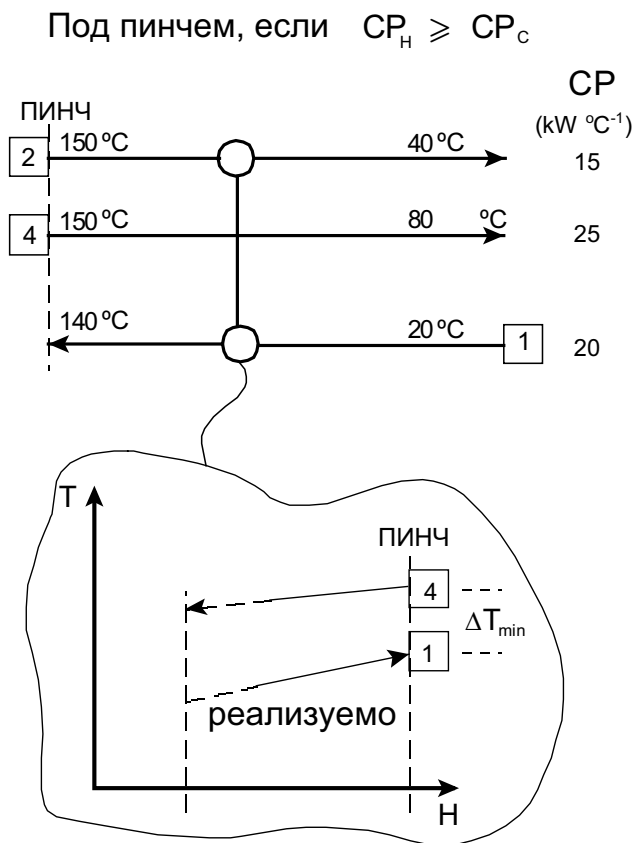
Зеркальная картина наблюдается для области под пинчем. Пусть CP холодного потока больше CP горячего потока (рис. 4.7). Вблизи пинч-точки пара потоков, указанная на рисунке уже имеет минимальную разность температур. Отдаляясь от пинча, разность температур между ними будет ещё уменьшаться, что противоречит заданной $\Delta T_{\min}$.



Объединение потоков нереализуемо

Рис. 4.7. Область под пинчем, $CP_{гор} < CP_{хол}$

Теперь пусть в этой же области под пинчем CP горячего потока больше CP холодного потока (рис. 4.6). Отдаляясь от пинч-точки, разность температур между этими потоками будет увеличиваться, что вполне допустимо.



Объединение потоков реализуемо

Рис. 4.8. Область под пинчем, $CP_{гор} > CP_{хол}$

Таким образом, в области под пинчем, CP холодного потока – кандидата на объединение – должно быть меньше CP горячего.

Следующее эвристическое правило, которое потребуется для правильного синтеза системы теплообменников – таблицы СР. Согласно этому правилу, для области над пинчем $СР_{гор} \leq СР_{хол}$. При этом, СР всех горячих потоков и СР всех холодных потоков записываются в два параллельных столбца в порядке убывания. Такое расположение СР горячих и холодных потоков указывает потенциальные пары потоков для объединения (рис. 4.9 а). Аналогично, для области ниже пинча, $СР_{хол} \leq СР_{гор}$. При этом, СР всех горячих потоков и СР всех холодных потоков записываются в два параллельных столбца в порядке убывания. Такое расположение СР горячих и холодных потоков указывает потенциальные пары потоков для объединения (рис. 4.9 б).

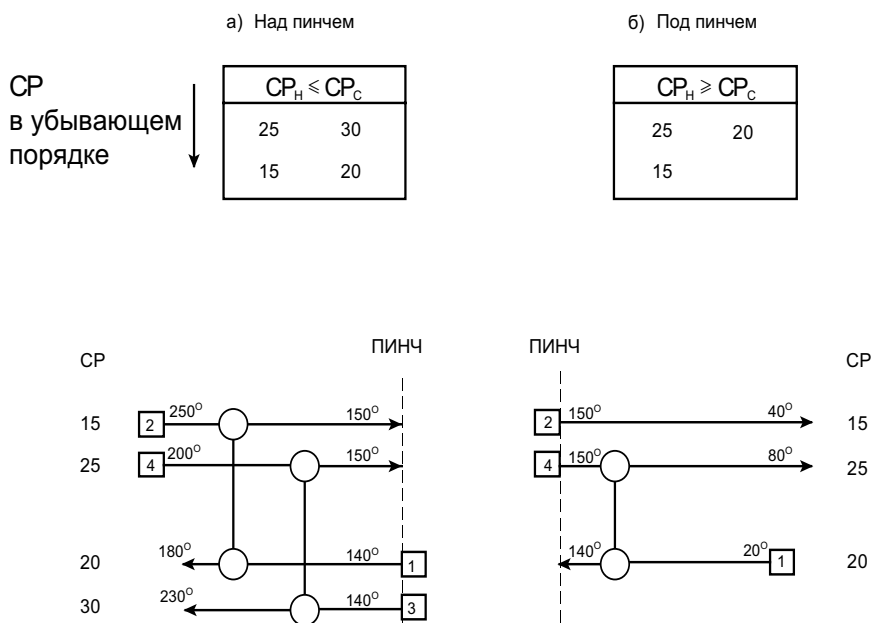


Рис. 4.9. Таблицы СР

После того, как обозначены потоки – кандидаты на объединение, необходимо определить величины тепловых нагрузок теплообменников (рис. 4.10)

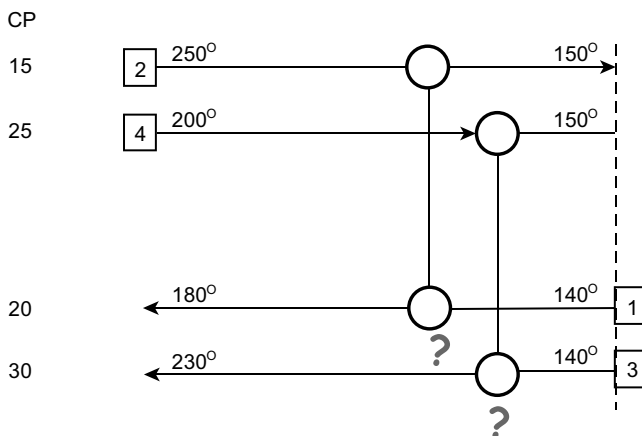


Рис. 4.10. Пары потоков определены, следующий шаг – определение нагрузок

Здесь следует максимизировать нагрузки и, по возможности, полностью рекуперировать тепло одного из объединяемых потоков. Для наглядности можно «вычеркнуть» поток, который полностью рекуперировал тепло, отметив его галочкой (рис. 4.11)

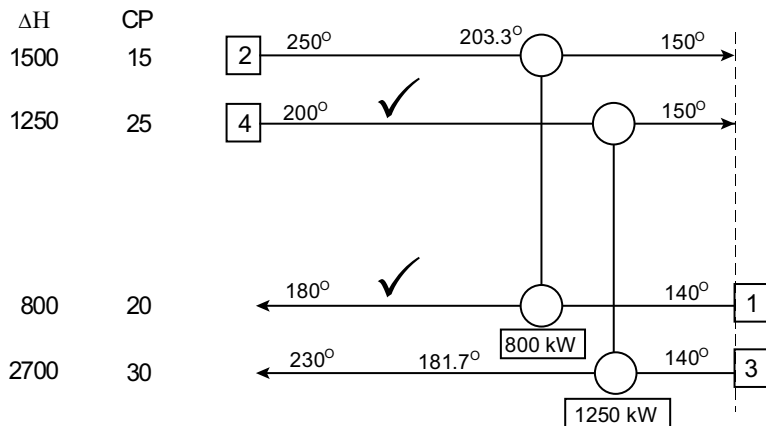


Рис. 4.11. Полная рекуперация тепла в двух потоках в области над пинчем

После того как теплообменники вблизи пинч-точки расставлены, необходимо объединить остающиеся потоки таким образом, чтобы они максимально рекуперировали тепло в своих парах, а недостающее тепло подвести с помощью горячих утилит, расположив теплообменники-нагреватели

(рис. 4.12). При правильном синтезе СТ, количество дополнительного тепла, подводимого к системе оказывается равным целевому значению потребности в горячей утилите, определенной на рис. 4.2, в данном примере 750 kW.

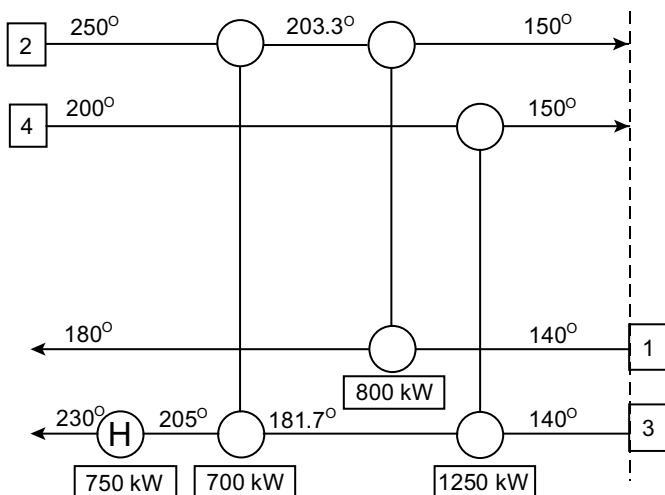


Рис. 4.12. Завершить синтез подсистемы в области над пинчем

Аналогичные шаги необходимо осуществить и для подсистемы ниже пинча (рис. 4.13).

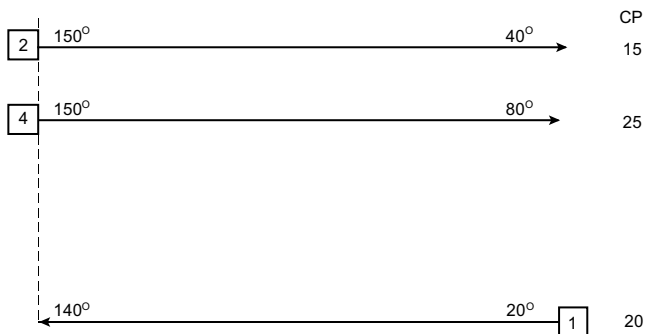


Рис. 4.13. Область под пинчем

Потоки – кандидаты на объединение определяются из таблицы CP для области под пинчем (рис. 4.9 б). В данном примере, в этой области только одна пара потоков. Максимизируем тепловые нагрузки в этом теплообмен-

нике и ставим галочку напротив потока, полностью рекуперировавшего тепло – потока 4 (рис. 4.14)

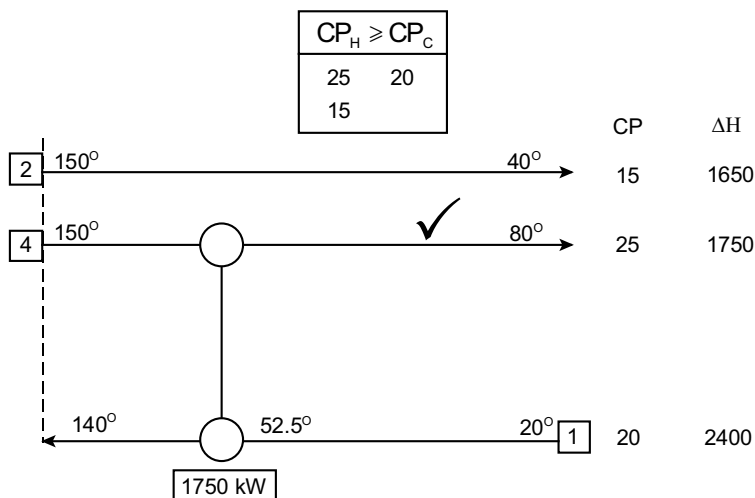


Рис. 4.14. Полная рекуперация тепла в одном потоке в области под пинчем

После того как теплообменник(и) вблизи пинч-точки расставлен(ы), необходимо объединить остающиеся потоки таким образом, чтобы они максимально рекуперировали тепло в своих парах, а недостающее тепло отвести с помощью холодной утилиты, расположив теплообменники-холодильники (рис. 4.15). При правильном синтезе СТ, количество тепла, отводимого от системы оказывается равным целевому значению потребности в холодной утилите, определенной на рис. 4.2, в данном примере 1000 kW.

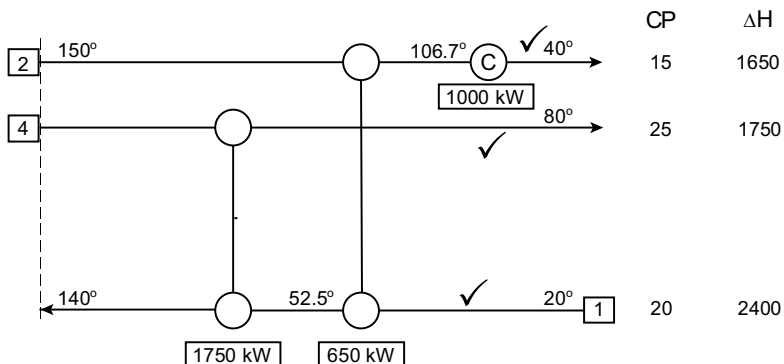


Рис. 4.15. Завершить синтез подсистемы в области под пинчем

Глава IV. Проектирование теплообменных систем
с максимальной рекуперацией тепла

Следует отметить, что теплообменник отмеченный на рис. 4.16, нарушает одно из правил СР (а именно, что в области ниже пинча $CP_{хол} \leq CP_{гор}$). Но поскольку этот теплообменник отстоит от пинч-точки, т.е. он «прикрыт» другим теплообменником, находящимся рядом с пинчем, эти правила можно нарушить. Тем не менее, обязательно нужно проверить разность температур.

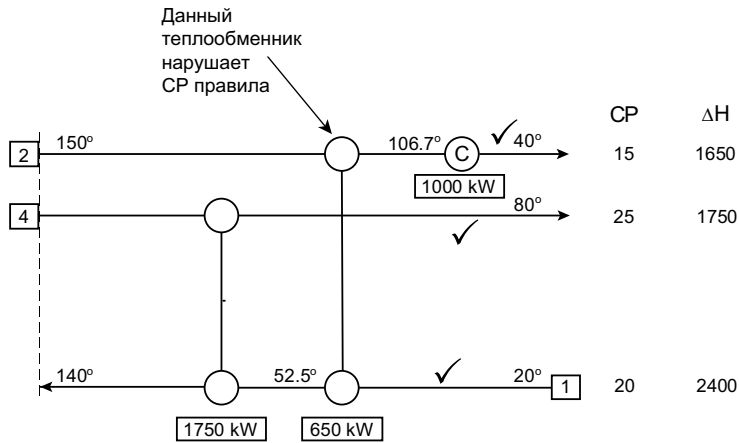


Рис. 4.16. Теплообменник нарушает СР правило

Полностью синтезированная система теплообменников для максимальной рекуперации тепла показана на рис. 4.17. Она получается простым объединением двух подсистем синтезированных для областей выше и ниже пинча.

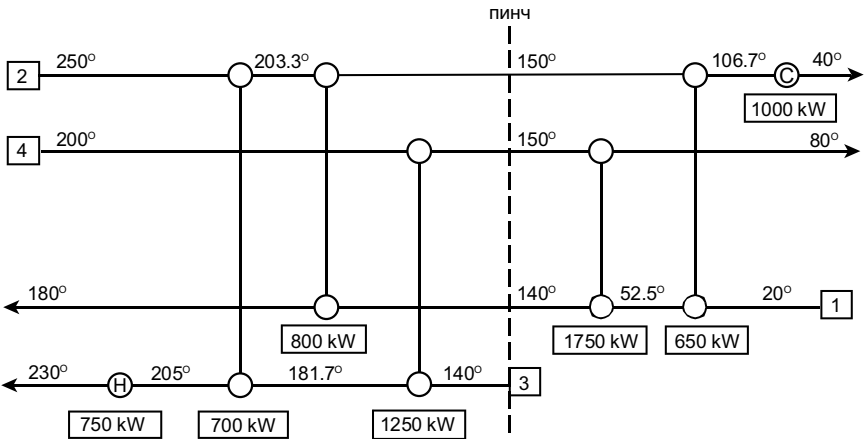


Рис. 4.17. Полностью синтезированная система теплообменников

ГЛАВА V

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ КОМПРОМИССЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

5.1 Локальные и глобальные экономические компромиссы

Ранее было показано, как можно устанавливать целевые значения энергетических затрат для систем теплообменников и утилитных систем. Перед тем, как определить конструкционные параметры теплообменной системы, нужно исследовать некоторые важные оптимизирующие переменные. Рассмотрим переменные, которые определяют структуру (топологию) технологической схемы при различных видах критериев эффективности, или целевых функций (целевых показателей проектирования). При оптимизации технологической системы следует различать два типа экономических компромиссов: локальные и глобальные.

Локальными называются компромиссы, которые рассматриваются для одного аппарата, или одного технологического процесса, т. е. когда не затрагиваются другие подсистемы в технологической системе.

Глобальные компромиссы рассматриваются для технологической системы в целом.

Но нужно быть очень осторожным в оценке того, является ли данный компромисс локальным или глобальным, когда мы имеем дело с оптимизирующими переменными, отражающими использование энергии в системе.

Рассмотрим простую одноконтурную технологическую схему (реактор – колонна разделения) (Рис. 5.1 (а)), в которой поток питания в реакторе превращается в поток продукта. Если в системе использует ректификационную колонну (РК) в качестве узла разделения, то возникает экономический компромисс между флегмовым числом R и числом тарелок, если составы потока питания и продуктов в ректификационной колонне постоянны, как показано на Рис. 5.1 (б). Это, конечно, предполагает, что если конденсатор и кипятыльник объединены своими тепловыми потоками с РК, то компромисс будет совершенно другим, чем тот, который показан на рисунке. Сей-

час важно отметить то, что, если кипятильник и конденсатор используют внешние вспомогательные потоки, то компромисс между флегмовым числом и числом тарелок не влияет на другие процессы в технологической схеме. Это локальный компромисс.

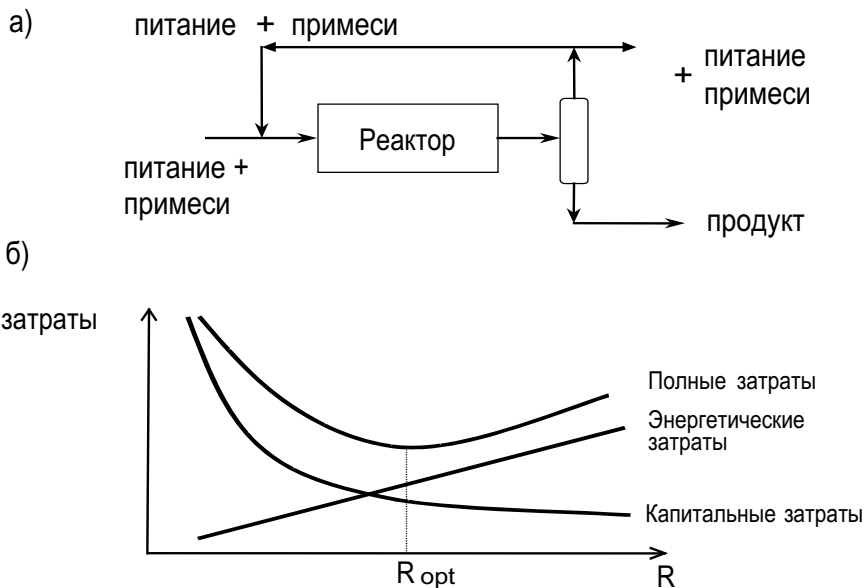


Рис. 5.1. Поиск экономического компромисса для одноконтурной технологической системы

В противоположность этому, если оптимизируется степень превращения в реакторе, то это является глобальным компромиссом, поскольку степень превращения в реакторе влияет на процессы всей технологической схемы. Если степень превращения в реакторе изменяется с целью оптимизации всей технологической схемы, то это влияет не только на размеры реактора, но также и на ректификационную колонну, поскольку теперь у нее другое задание по разделению. Тепловые нагрузки на реактор теперь будут другими, также как и тепловые нагрузки на кипятильник и конденсатор в ректификационной колонне.

Суммируя стоимости реактора и рецикла в общую стоимость технологической системы, мы увидим, что существует оптимальная степень превращения в реакторе.

Таким образом, для одноконтурной технологической системы «реактор-колонна разделения» существуют как локальные, так и глобальные компромиссы (Рис. 5.2).

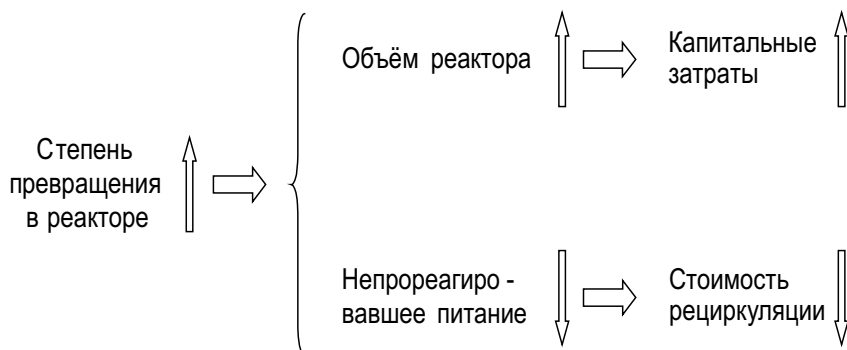


Рис. 5.2. Локальные и глобальные компромиссы для одноконтурной технологической системы «реактор- колонна разделения»

5.2 Экономические компромиссы «капитальные затраты – расход энергии»

Экономические компромиссы «капитальные затраты – расход энергии» мы рассматриваем на примере проектирования теплообменной системы и системы утилит.

Для новых проектов наша задача – минимизировать полные затраты (затраты энергии и капитальные затраты) для теплообменной системы. Но с чего начать проектирование? Прежде всего нужно знать, что каждую величину $\Delta T_{\min}$ необходимо задавать в начале проектирования.

Рассмотрим пример определения экономического компромисса при проектировании оптимальной технологической системы (Рис. 5.3).

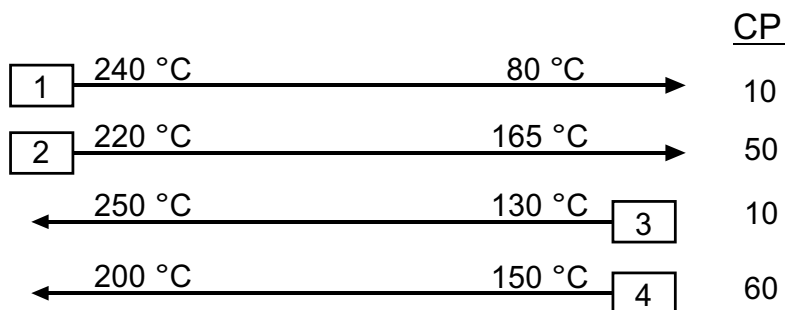
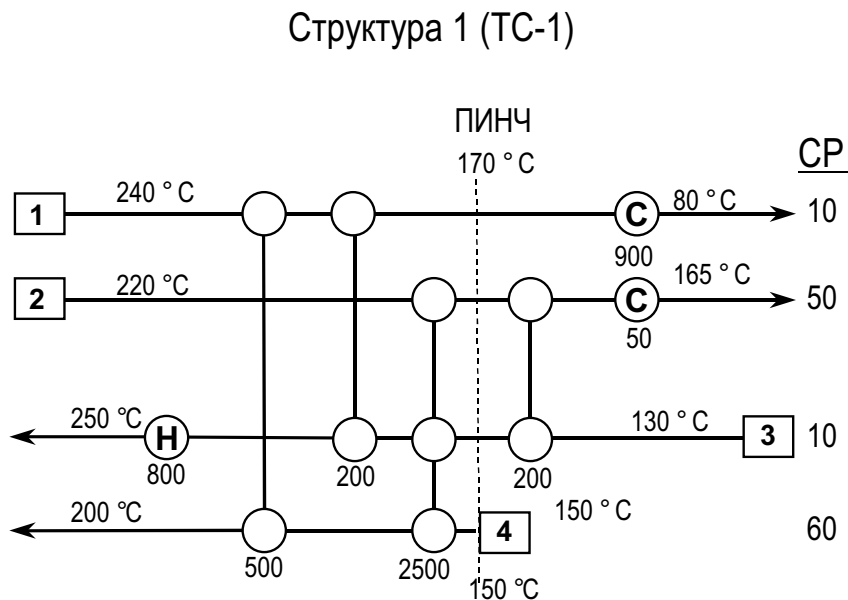


Рис. 5.3. Теплообменная система, которая должна быть спроектирована с минимальными полными затратами

Предположим, мы выбрали $\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$ и после задания целевых значений энергии получили некоторую структуру ТС-1 (Рис. 5.4). Рассчитаем полные затраты для этой ТС и примем их за 100%.



Структура 1 (ТС-1) – максимальная рекуперация энергии
 $\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$
Полные затраты = 100%

Рис. 5.4. Сеточная диаграмма для структуры 1
проектируемой теплообменной системы

Мы не знаем, правильно ли мы выбрали $\Delta T_{\min}$, но оптимизируем теплообменную систему для уменьшения полных затрат. При оптимизации рассчитывается компромисс между стоимостью энергоисточников и капитальными затратами. Существуют программы, которые могут рассчитывать подобные компромиссы и которые базируются на методике интеграции технологических систем. В данном случае полные затраты для структуры ТС-1 были уменьшены до 96% по сравнению с начальным вариантом, при этом $\Delta T_{\min}$ оказалась равной 14°C .

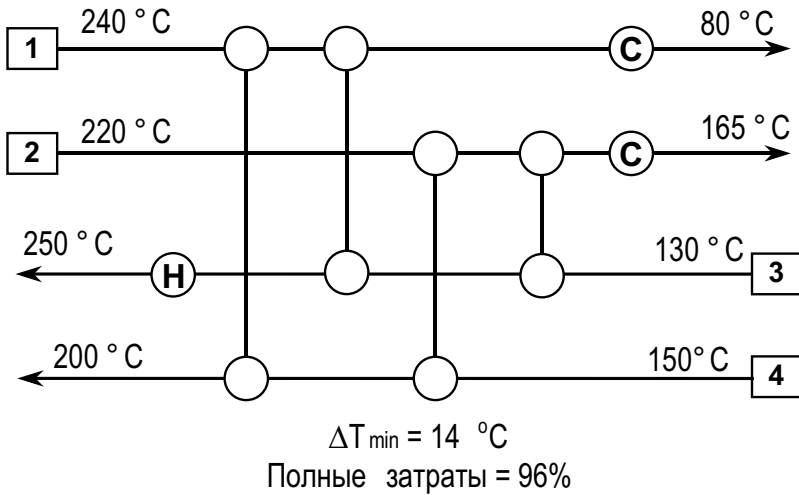


Рис. 5.5. Тепловая сеточная диаграмма структуры 1
после параметрической оптимизации

Для указанной теплообменной системы ТС-1, получены результаты, показанные на Рис. 5.6. Как видно из рисунка, оптимальная минимальная разность температур будет $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для данной структуры ТС-1.

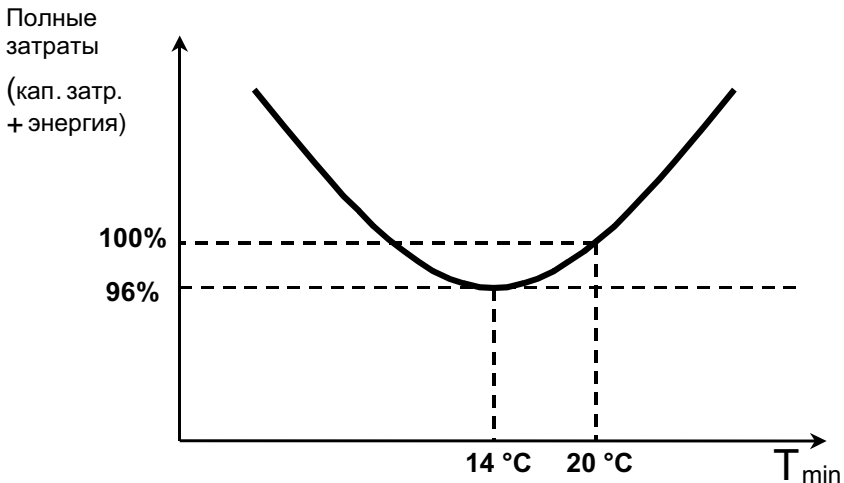
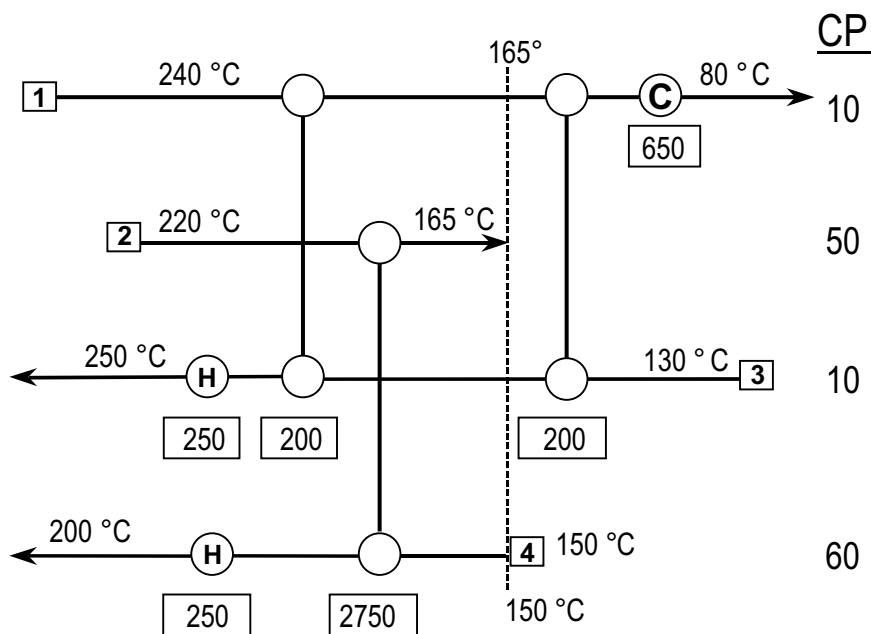


Рис. 5.6. Результат параметрической оптимизации структуры ТС-1

Теперь, если мы начнем проектирование системы теплообменников с задания $\Delta T_{\min} = 15^\circ\text{C}$ (а не 20°C , как для структуры ТС-1 – с максимальной рекуперацией энергии), то получим другую структуру и другие полные затраты (Рис. 5.7). В данном случае полные затраты меньше, чем для структуры ТС-1.



Структура 2 (ТС-2) – максимальная рекуперация энергии
 $\Delta T_{\min} = 15^\circ\text{C}$
Полные затраты = 90%

Рис. 5.7. Тепловая сеточная диаграмма для структуры 2 проектируемой системы теплообменников

Мы видим, что структура 1 и структура 2 имеют разные кривые целевых функций (критериев эффективности). Для каждой структуры существует свой параметрический минимум (Рис. 5.8). Мы не можем достичь минимума полных затрат (90%) при выборе структуры 1 как оптимальной структуры.

Теперь ясно, что минимальные затраты, получаемые при оптимизации ТС, зависят от структуры, которую мы первоначально задаем. Поэтому нужно начать с проектирования технологической схемы (структуры) ТС, имеющей наименьшие полные затраты (Рис. 5.9).

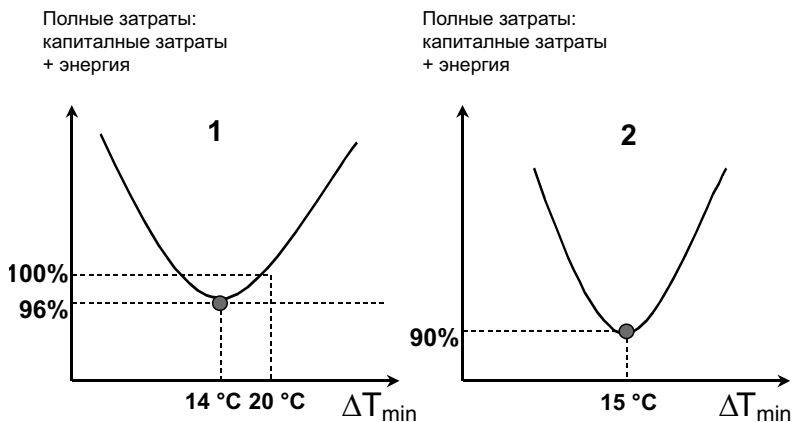


Рис. 5.8. Для разных $\Delta T_{\min}$ получены разные структуры ТС и разные кривые целевых функций



Рис. 5.9. Определение оптимальной структуры ТС

Разные значения полных затрат для разных технологических схем (структур) получаются из-за различий в требуемой энергии, площади поверхности теплообмена и числа единиц аппаратов в системе теплообменников (Рис. 5.10).

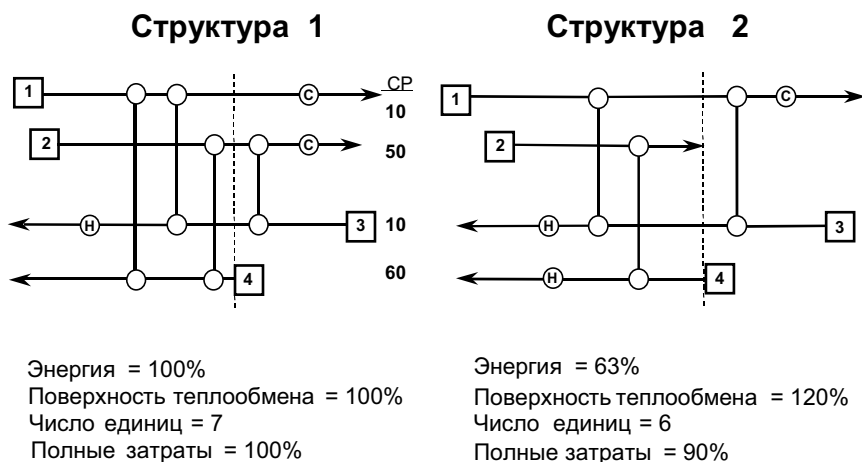


Рис. 5.10. Различные структуры систем теплообменников имеют различные значения критериев эффективности, т. е. целевых показателей проектирования

Необходимо рассчитать при проектировании структуры системы теплообменников: количество энергии (количество теплоты), площадь поверхности теплообмена и число аппаратов. Задавая различные целевые значения этих параметров и выбирая различные виды критериев эффективности системы теплообменников, т. е. целевых функций, мы получим возможность выбрать правильную оптимальную структуру системы теплообменников. Вопросу определения целевых значений энергии мы посвятили несколько предыдущих глав. Перейдем к определению величины целевого значения капитальных затрат.

5.3 Прогнозирование величины капитальных затрат на проектируемые теплообменные системы

Можно ли спрогнозировать величину капитальных затрат проектируемой ТС? Прежде всего нужно вспомнить, от чего зависят капитальные затраты как критерий эффективности («целевая функция», или «целевое значение», или «целевой показатель» проектирования технологической схемы).

На капитальные затраты теплообменной системы влияют следующие факторы (Рис. 5.11):



Рис. 5.11. Факторы, влияющие на величину капитальных затрат теплообменных систем

- площадь поверхности теплообмена – стоимость теплообменника прямо пропорциональна площади поверхности;
- число аппаратов – очень часто доля постоянного капитала, приходящегося на каждый теплообменник, довольно значительна. Поэтому, чтобы минимизировать капитальные затраты, нужно стремиться иметь минимальное количество теплообменников;
- число ходов – когда требуется больше, чем одноходовой теплообменник, можно использовать многоходовые теплообменники;
- конструкционные материалы – из-за разных сред, в которых работают теплообменники, разных давлений и т.д. для теплообменников могут потребоваться различные конструкционные материалы;

- тип оборудования – тип используемого теплообменника (кожухотрубчатый, пластинчатый, оребренный и т. д.) также влияет на величину капзатрат;
- перепад давлений – влияет на коэффициент теплопередачи технологических потоков, а это, в свою очередь, влияет на площадь поверхности теплообмена и, следовательно, на капитальные затраты.

Определим влияние величины площади поверхности теплообмена на капитальные затраты.

Рассмотрим противоточный теплообменник (Рис. 5.12), передающий тепло Q между двумя потоками с постоянными значениями водяного эквивалента $СР$. Из теории теплопередачи известно, что противоточному теплообменнику требуется меньшая поверхность теплопередачи, чем другим конфигурациям. Формула расчета минимальной площади поверхности ($A_{\min}$) показана на Рис. 5.12.

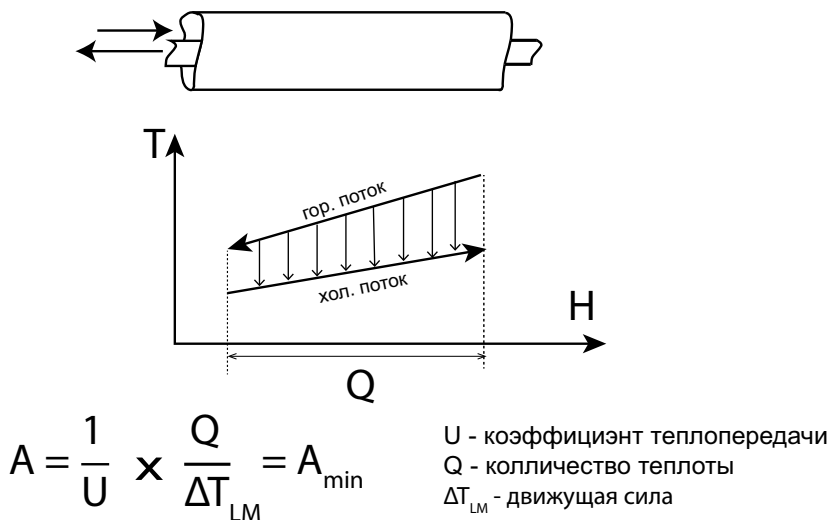


Рис. 5.12. Противоточный теплообменник и его тепловая диаграмма

Однако реальные многоходовые теплообменники не являются идеально противоточными. Поэтому площадь поверхности для них при тех же условиях больше, чем для идеального противоточного теплообменника (Рис. 5.13).

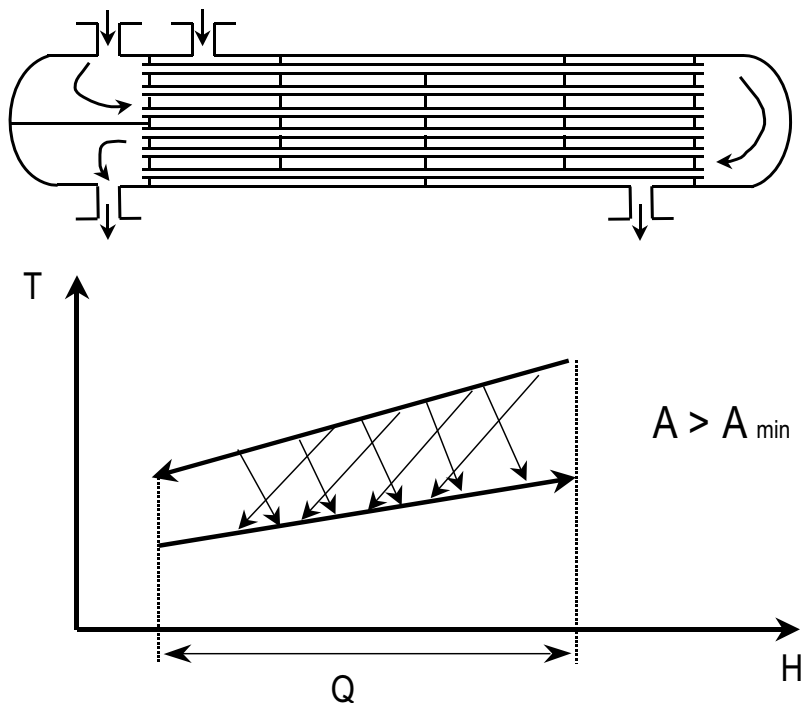


Рис. 5.13. Многоходовой кожухотрубчатый теплообменник
и его тепловая диаграмма

Рассмотрим более сложный пример синтеза структуры оптимальной ТС для случая, когда в системе имеется более 2-х технологических потоков. Пусть у нас 2 горячих и 1 холодный поток. Существует два варианта теплообмена, которые мы можем выбрать (Рис. 5.14).

1. Поток С сначала нагревается на холодном конце менее горячим потоком (потоком В), а затем более горячим потоком (потоком А). При этом тепло передается при максимально возможных движущих силах во всей системе. Этот вариант является аналогом чистого противоточного теплообмена, который был рассмотрен ранее. Требуемая площадь поверхности – минимальна.

2. Поток С нагревается сначала более горячим потоком (потоком А), а потом менее горячим (потоком В). Объединение потоков А и В дает большую движущую силу, поэтому площадь поверхности будет меньшей. Однако второе тепловое объединение потоков (В и С) дает меньшую движущую силу. Этот вариант является аналогом непротивоточного теплообмена. Общим результатом будет увеличение общей площади по-

верхности теплообмена несмотря на то, что каждый отдельный теплообменник является противоточным.

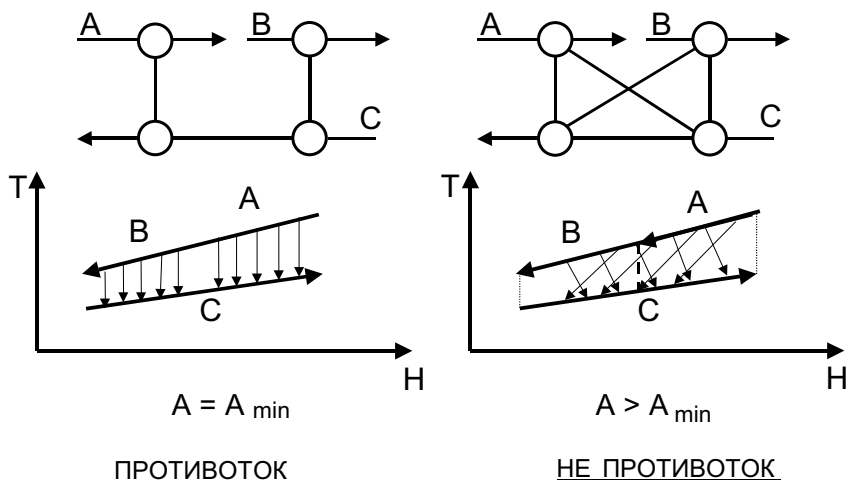


Рис. 5.14. Различные варианты синтеза структуры теплообменной системы

Таким образом, чтобы получить минимальную поверхность теплообмена, нужно при использовании энтальпийной диаграммы передавать тепло вертикально от горячей составной тепловой кривой к холодной. Результат гарантирован, когда коэффициент теплопередачи для всех технологических потоков одинаков (Рис. 5.15).

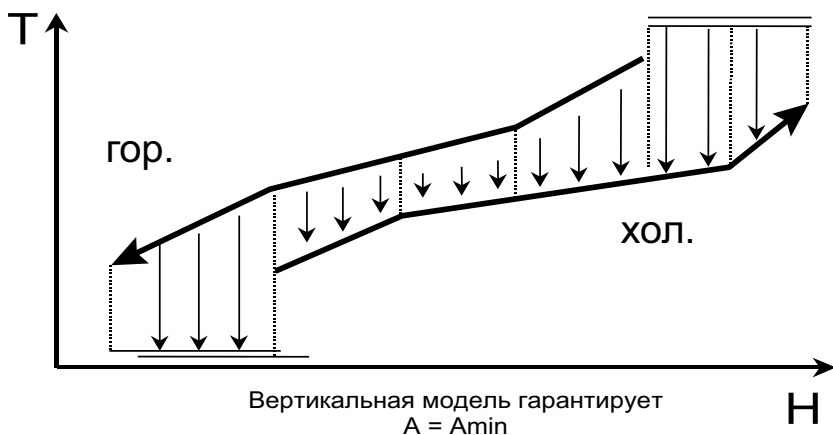


Рис. 5.15. Составные тепловые кривые проектируемой тепло-обменной системы

5.3 Прогнозирование величины капитальных затрат на проектируемые теплоо-менные системы

Каждый раз, когда изменяется множество потоков, создается новый энтальпийный интервал. Внутри каждого энтальпийного интервала горячие потоки находятся в энтальпийном балансе с холодными потоками. Вертикальный теплообмен подразумевает, что передача теплоты через энтальпийные интервалы невозможна (Рис. 5.16). Таким образом, каждый горячий поток на данном интервале должен быть объединен с холодным потоком внутри этого интервала.



Рис. 5.16. Составные тепловые кривые при вертикальном теплообмене между потоками внутри энтальпийного интервала

Таким образом, мы можем предсказать по составным тепловым кривым системы теплообменников (Рис. 5.17) требуемую площадь поверхности теплообмена для всей теплообменной системы, суммируя требуемые площади поверхности для каждого энтальпийного интервала.

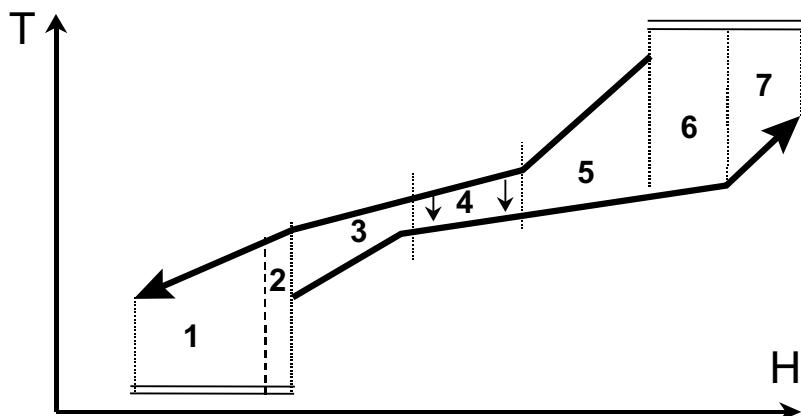


Рис. 5.17. Составные тепловые кривые позволяют предсказывать целевые значения площади поверхности

Поверхность ситемы теплообменников:

$$A_{\min} = \sum_{\text{interval}}^i \left[\frac{1}{\Delta T} \cdot \sum_{\text{interval}}^i \frac{q}{h} \right]$$

Можно задавать целевые значения площади поверхности (для $u=\text{const}$)

Если значения u различны, то общая площадь поверхности теплообмена равна:

$$A_{\min} = \frac{q_i}{u_i} \quad (5.1)$$

где A – площадь поверхности теплообмена, q_i – тепловая нагрузка на i -ом интервале, u_i – коэффициент теплопередачи на i -ом интервале.

На практике вертикальная модель теплообмена даёт очень хорошие результаты, хотя не является строгой моделью.

Для различных значений u можно использовать удельные значения u в уравнении площади поверхности теплообменной системы, и, таким образом, получить целевые значения поверхности.

Однако, в этом случае, строго говоря, вертикальная модель не является корректной, так как могут возникнуть процессы передачи тепла за пределами энтальпийных интервалов. Но изменение площади поверхности системы теплообменников в таких случаях незначительно по сравнению с вертикальной моделью.

Опыт показывает, что хорошие реальные проекты систем теплообменников не выходят за пределы 10 % от целевых значений площади поверхности, рассчитанных по вертикальной модели теплообмена в пределах энтальпийных интервалов.

5.4 Определение глобальных значений целевых функций (капитальных и эксплуатационных затрат) при проектировании оптимальных теплообменных систем

Мы рассмотрели, как задаются целевые значения энергии и площади поверхности теплообмена в виде функции от $\Delta T_{\min}$. Теперь рассмотрим, как они взаимосвязаны друг с другом.

По составным тепловым кривым можно задавать целевые значения энергии и площади поверхности для различных значений $\Delta T_{\min}$ до начала проектирования (Рис. 5.18).

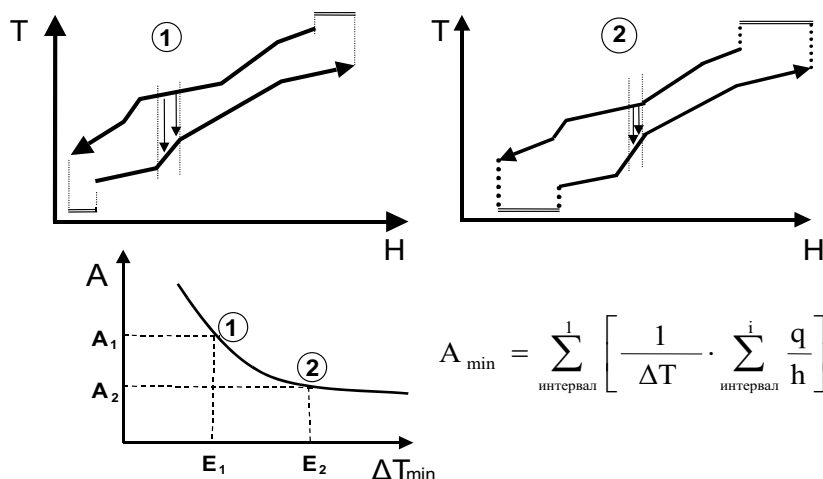


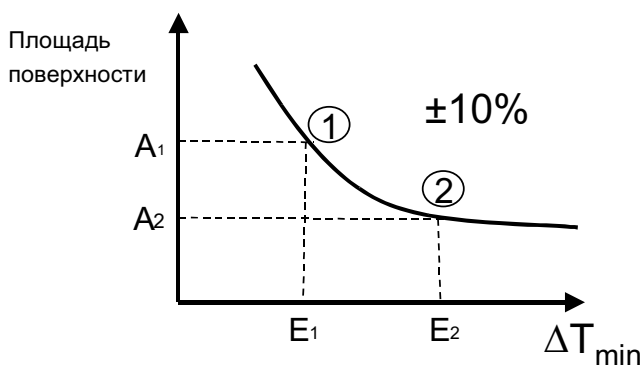
Рис. 5.18. Определение целевых значений площади поверхности для проектируемой теплообменной системы

Когда СТК близки по своему виду к графику 1 (небольшая движущая сила $\Delta T_{\min}$), требуются большие значения поверхности теплообмена, чем в случае, когда СТК расположены дальше друг от друга – график 2 (большая движущая сила $\Delta T_{\min}$). Как показывает кривая и уравнение площади поверхности, площадь поверхности нелинейно зависит от количества теплоты.

Если мы знаем целевое значение площади поверхности теплообмена A , то, применив подходящее правило расчета капитальных затрат, можем предсказать величину капзатрат (Рис. 5.19).

На практике значения площади поверхности теплообмена рассчитываются с точностью $\pm 10\%$ от целевых значений поверхности. При переходе к капитальным затратам эта ошибка уменьшается до 3% (Рис. 5.19).

Дело в том, что расчет капитальных затрат ведется на основе предположения, что общая площадь поверхности теплообменной системы равномерно распределяется по всем теплообменникам (хотя на самом деле это не так). Проект будет более дешевым, если используется много больших теплообменников и немного маленьких вместо теплообменников одинакового размера, однако последний вариант решает задачу унификации теплообменного оборудования.



Применим правила расчета стоимости теплообменников — получим:

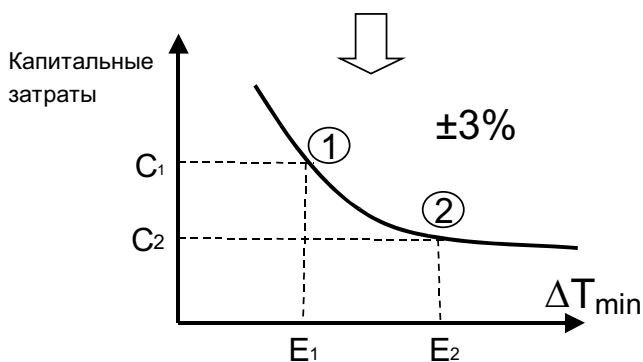


Рис. 5.19. Определение целевых значений площади поверхности теплообмена и капитальных затрат

5.4 Определение глобальных значений целевых функций при проектировании оптимальных теплообменных систем

Теперь мы можем выбрать компромисс между стоимостью энергии и капитальными затратами. Здесь мы определим минимальное значение полных затрат. В этой точке $\Delta T_{\min}$ является оптимальной (Рис. 5.20).

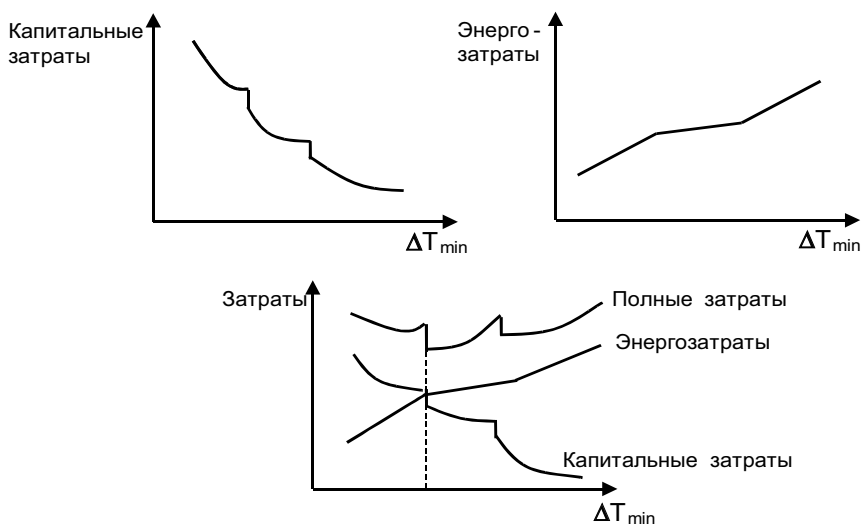


Рис. 5.20. Поиск экономического компромисса между различными видами затрат теплообменной системы

Для расчетов глобальных значений целевых функций нужно задать следующие данные: параметры потоков и стоимости, затем рассчитать $\Delta T_{\min}$ до начала проектирования на основе предварительных физико-химических, термодинамических и технологических рассуждений с использованием эвристических правил (Рис. 5.21).

На рис. 5.21 представлена блок-схема алгоритма расчета глобальных значений целевых функций при проектировании оптимальных энергосберегающих ТС.

Для рассматриваемого примера решения задачи синтеза оптимальной системы теплообменников (Рис. 5.3) значение оптимального $\Delta T_{\min} = 15^\circ\text{C}$, которое мы получили до начала проектирования. Проект 2, дающий минимальную величину полных затрат (Рис. 5.22), был разработан уже в самом начале на основе предварительных термодинамических и технологических рассуждений, в том числе, с применением разнообразных эвристических правил (эвристик) пинч-метода.

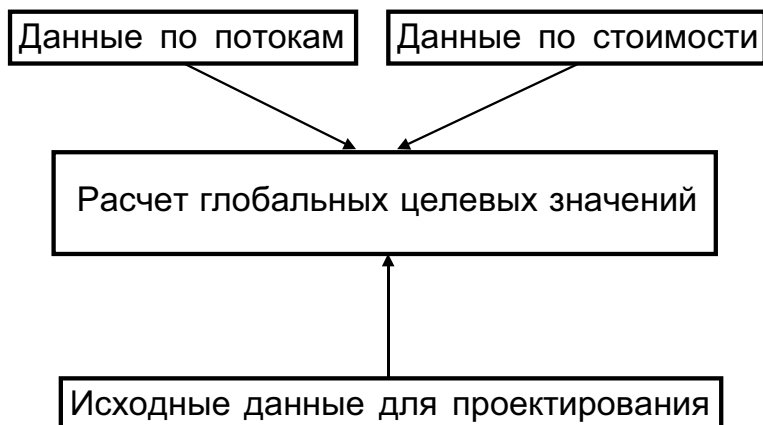


Рис. 5.21. Блок-схема алгоритма расчета глобальных значений целевых функций

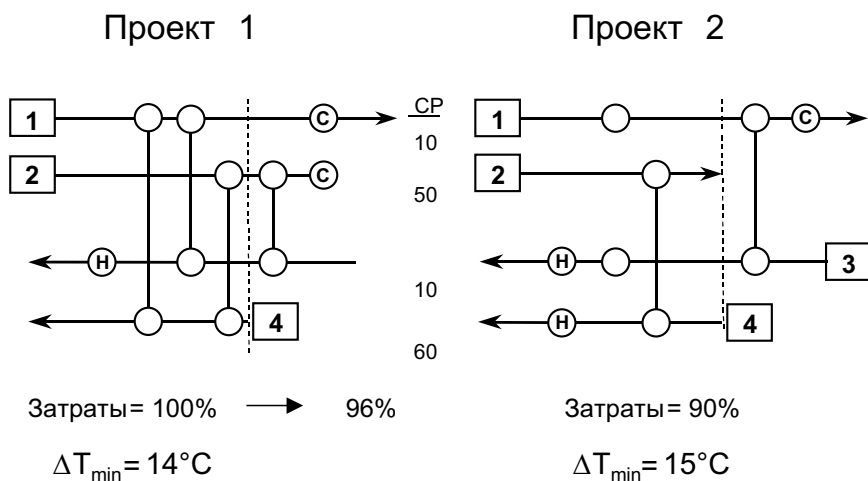


Рис. 5.22. Различные проекты теплообменной системы для различных целевых значений

На рис. 5.23 представлен график целевой функции полных затрат, рассчитанный при помощи одного из существующих на рынке программных пакетов.

5.4 Определение глобальных значений целевых функций при проектировании оптимальных теплообменных систем

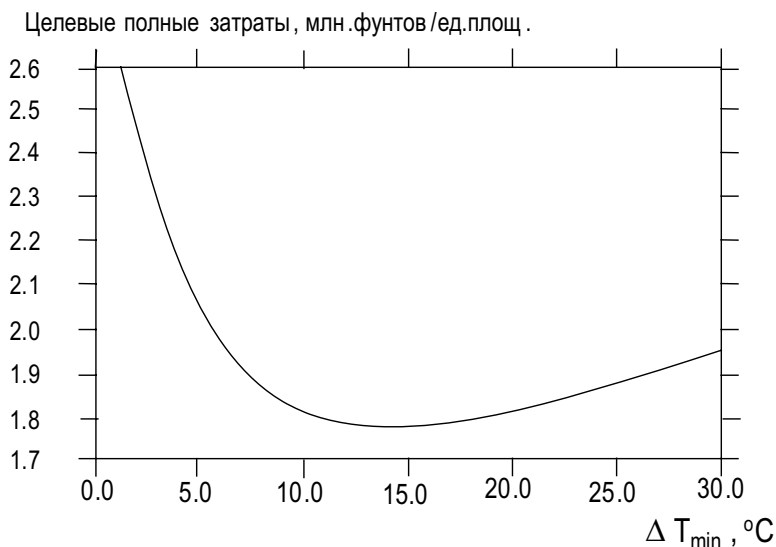


Рис. 5.23. График целевой функции в виде полных затрат при изменении величины движущей силы процессов теплообмена

Таким образом, получаем следующий вывод: можно проводить оптимизацию структуры ТС ещё до начала поэтапного решения сложной задачи проектирования. Эта возможность предварительной оценки значения целевой функции для ещё не сгенерированной технологической схемы проектируемой ТС является сильнейшей стороной пинч-метода проектирования оптимальных энергосберегающих теплообменных систем при использовании различных видов критериев эффективности технологической системы (целевых функций, или целевых значений проектирования).

ГЛАВА VI

ВЫБОР ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ (УТИЛИТ)

6.1 Общие предпосылки к выбору утилит

Перерабатывающие предприятия, представляющие собой совокупность различных технологических систем, редко используют по одному виду энергоносителей в виде одного горячего энергоисточника и одного холодного энергопотребителя. Существует два класса энергоносителей (или утилит от английского *utilities*) для предприятий: энергоисточники (горячие утилиты) и энергопотребители (холодные утилиты).

У предприятия существует широкий выбор вида горячих утилит. Если требуется нагревать технологические потоки до очень высоких температур, то можно использовать печной газ или газ на выходе турбины. Для нагревания технологических потоков до менее высоких температур можно использовать пар различного давления (пар высокого давления – ВД, пар среднего давления – СД, пар низкого давления – НД).

Аналогично, существует широкий выбор холодных утилит. Для охлаждения технологических потоков можно использовать процессы генерирования пара, хладагенты, тепловые насосы, холодную воду и т. д.

На рис. 6.1 приведена блок-схема системы энергоснабжения химического предприятия. На рисунке использованы следующие обозначения: Q – теплота, W – механическая работа, F – топливо, CW – охлаждающая вода, которая может быть или хладоносителем или использоваться при генерировании пара при предварительном нагревании воздуха и т. д.

Обычно внешние высокотемпературные горячие утилиты для технологической системы являются более дорогими, чем низкотемпературные горячие утилиты. Необходимо стараться использовать горячие внешние энергоисточники при менее высоких температурах, что позволяет минимизировать стоимость потребляемой системой энергии, а генерировать их как можно более высокотемпературными, что позволяет максимизировать доход от технологической системы за счет такого энергоисточника.

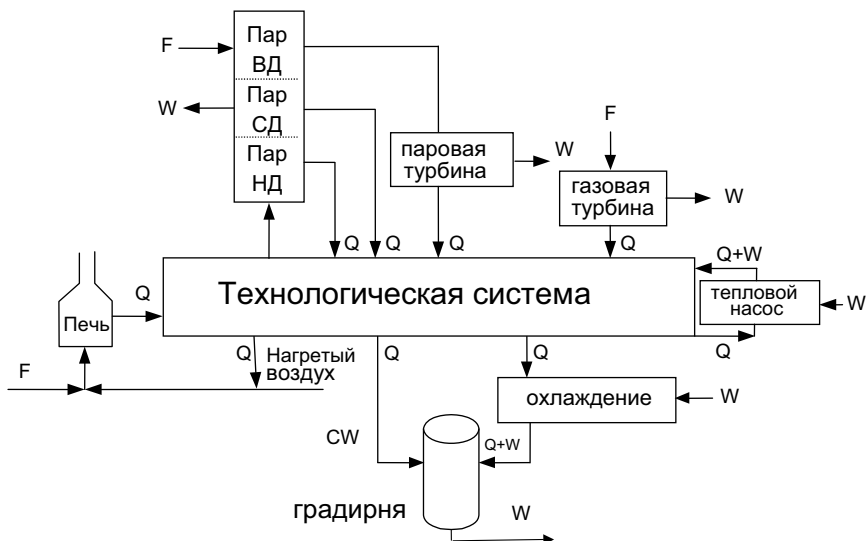


Рис. 6.1. Блок-схема системы энергоснабжения химического предприятия

Обратное утверждение справедливо для холодных утилит, так как чем ниже температура внешнего энергопотребителя, тем более дорогим он является.

6.2 Методика выбора утилит технологической схемы с использованием составных кривых

При рациональном выборе видов утилит необходимо определить наиболее низкий температурный уровень требуемого для технологической системы горячего энергоисточника и наиболее высокий температурный уровень требуемого холодного энергопотребителя для данной системы.

Рассмотрим методику использования составных тепловых кривых для выбора и размещения внутри технологической схемы утилит (Рис. 6.2).

Предположим, мы хотим использовать пар низкого давления (НД) в качестве второго горячего энергоисточника наряду с паром высокого давления (ВД). Поскольку пар НД дешевле, мы хотим максимизировать его использование, снижая потребление пара ВД. Однако, по мере увеличения тепловой нагрузки пара НД, мы достигнем точки, в которой наблюдается $\Delta T_{\min}$ между паром и холодной составной кривой технологических потоков. Это новое «узкое» место на смещенных составных кривых называется «пинч-точкой энергоисточников».

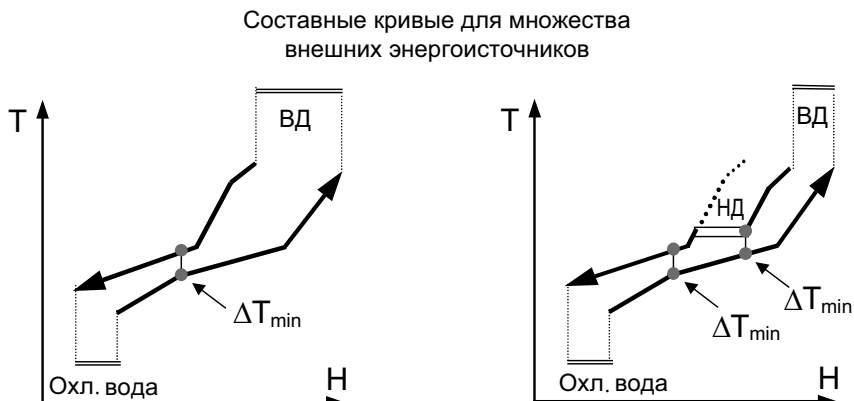


Рис. 6.2. Применение составных кривых для выбора энергоисточников

В целом, для любого промежуточного энергоисточника его тепловая нагрузка максимизируется при достижении $\Delta T_{\min}$ и, соответственно, при образовании «утилитного пинча». Таким образом, для любого промежуточного энергоисточника образуется «утилитный пинч». Это справедливо для любой части составной кривой технологической системы (выше или ниже пинча) как для генерирования, так и потребления внешней энергии в системе.

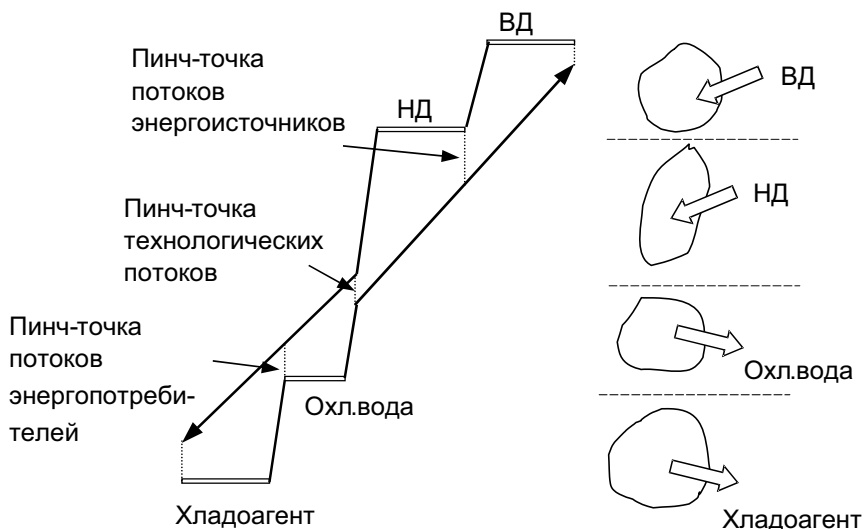


Рис. 6.3. Представление различных энергоносителей на составных кривых

Рассмотрим возможность представления на энтальпийной диаграмме составных кривых для всех типов утилит.

Первая проблема, с которой мы сталкиваемся – это необходимость «разрезать» составные кривые технологических потоков для того, чтобы разместить в технологической системе промежуточный энергоисточник (Рис. 6.4). Это может оказаться достаточно неудобным, особенно, когда у нас есть несколько таких энергоисточников.

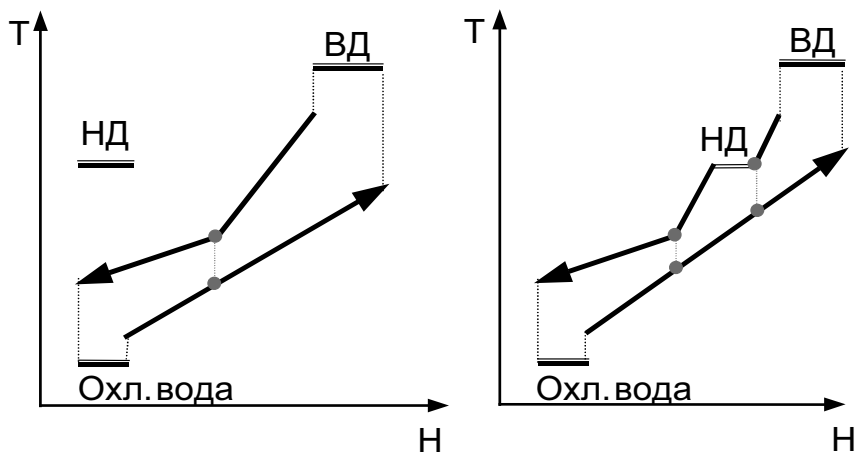


Рис. 6.4. Проблема 1: «разрезание» составных кривых

Рассмотрим еще один простой пример (Рис. 6.5 (а)).

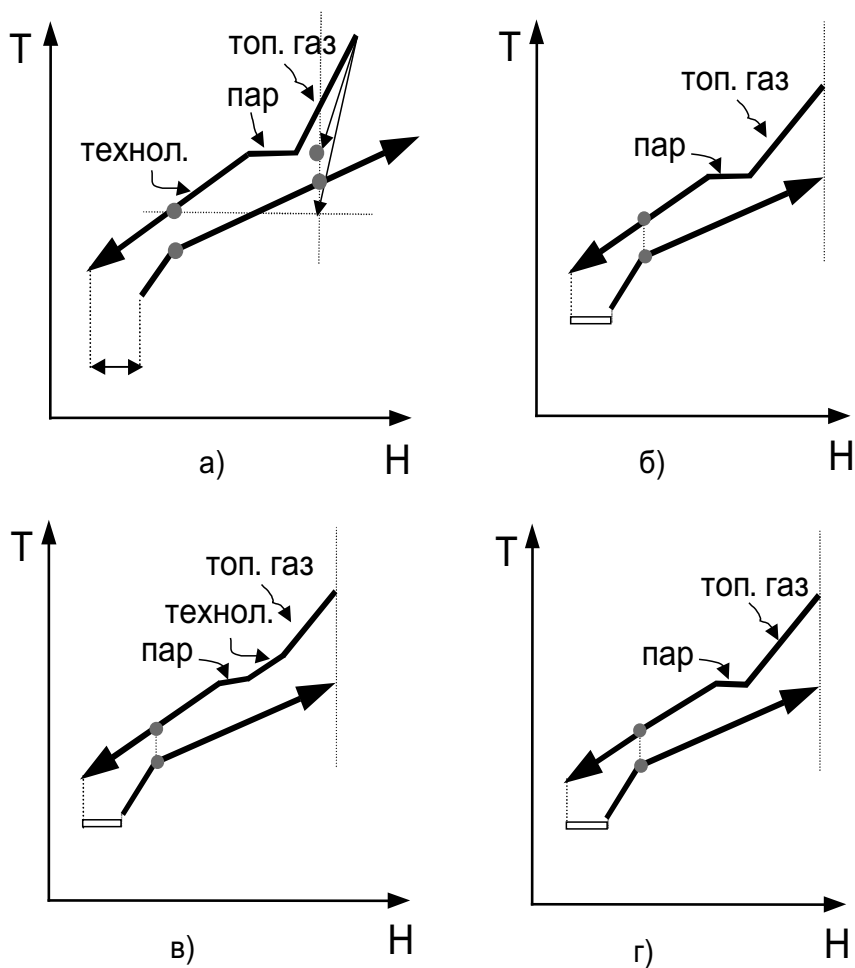


Рис. 6.5. Проблема 2: трудности расчета значений параметров энергоносителей при использовании составных кривых

На горячем конце холодной составной кривой технологических потоков должна быть слишком высокая температура, чтобы можно было использовать пар в качестве горячего энергоисточника, поэтому используем топочный газ. Чтобы минимизировать потребление печного топлива, нужно минимизировать потоковую теплоемкость CP топочного газа. Как это показать на графике составных кривых? Есть три варианта, в каждом из которых имеются трудности при размещении энергоисточников на составных кривых:

1. Можно задать целевое значение температуры топочного газа равной «горячему концу» горячей составной кривой. Но это не минимизирует величину потоковой теплоемкости $СР$ топочного газа (Рис. 6.5 (б)).

2. Можно задать целевое значение температуры топочного газа таким образом, что пинч топочного газа (то есть утилитный пинч) будет при $\Delta T_{\min}$. Однако, если перерисовать горячую составную кривую, которая будет теперь включать топочный газ, то увидим, что утилитный пинч в действительности не будет соответствовать $\Delta T_{\min}$ (Рис. 6.5 (в)).

3. Можно задать целевое значение температуры топочного газа, равное горячей температуре «пинча», предполагая, что это будет минимальной температурой, при которой топочный газ может быть использован в качестве горячей утилиты. В этом случае, перерисовав горячую составную кривую, которая теперь включает в себя топочный газ, мы увидим, что полученное $\Delta T_{\min}$ меньше заданного $\Delta T_{\min}$. В других случаях это может привести и к физической нереализуемости процесса теплообмена (Рис. 6.5 (г)).

Требуется применить метод «проб и ошибок» для определения возможной величины потоковой теплоемкости $СР$ топочного газа. Таким образом, составные кривые – это, к сожалению, не идеальный способ выбора энергоносителей для технологической системы.

6.3 Методика выбора энергоносителей предприятия с использованием больших составных кривых

Большие составные кривые (БСК) – это еще один способ представить процессы потребления и преобразования энергии в технологической системе на диаграмме «температура – энтальпия».

На рис. 6.3 мы видели, что утилитные пинчи для технологической системы образуются при $\Delta T_{\min}$. Чтобы гарантировать отсутствие нарушения $\Delta T_{\min}$, применим смещенные составные кривые. Горячая составная кривая сдвигается вертикально вниз на $\Delta T_{\min}/2$, а холодная составная кривая сдвигается вертикально вниз на $\Delta T_{\min}/2$. При этом неявно подразумевается, что теплопередача осуществляется точно при $\Delta T_{\min}$. Остаточная потребность в нагревании или охлаждении, то есть та потребность, которая не была удовлетворена за счет рекуперации тепла технологических потоков, покрывается за счет утилит (Рис. 6.6).

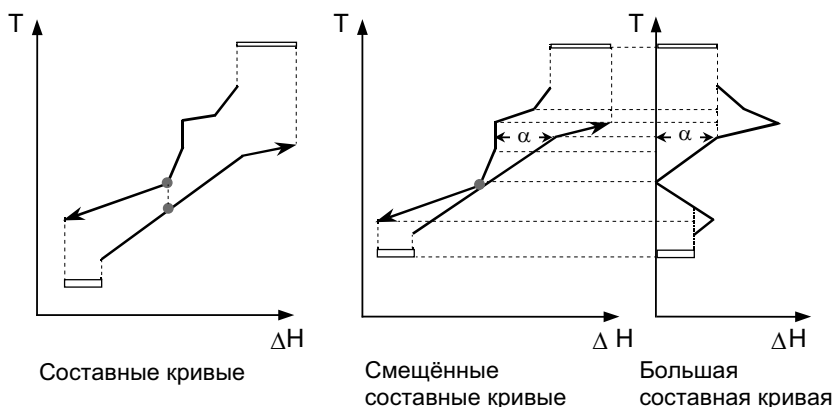


Рис. 6.6. Построение большой составной кривой (БСК) технологической системы

Большая составная кривая – это кривая остаточной потребности в нагревании или охлаждении для технологической системы. Координаты точек БСК – это расстояние по горизонтали между горячей и холодной составными кривыми, изображенными в координатах «температура – энтальпия» (Рис. 6.7).

Как видно из рисунка, большая составная кривая отображает информацию лишь об энтальпии технологических потоков. Более точно ее можно называть большой составной кривой технологических потоков.

6.3 Методика выбора энергоносителей предприятия с использованием больших составных кривых

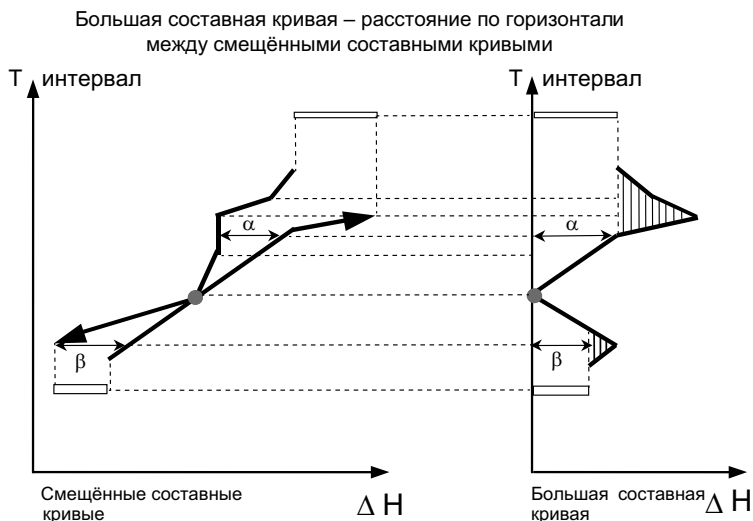


Рис. 6.7. Определение координат точек большой составной кривой

Большая составная кривая позволяет рассчитать параметры утилит (Рис. 6.8), также как и составные кривые. Количество дополнительного тепла, необходимого для ввода в систему, определяется расстоянием по горизонтали между температурной осью и горячим концом большой составной кривой, соответственно, количество тепла, которое нужно отвести из системы, определяется расстоянием по горизонтали между температурной осью и холодным концом большой составной кривой.

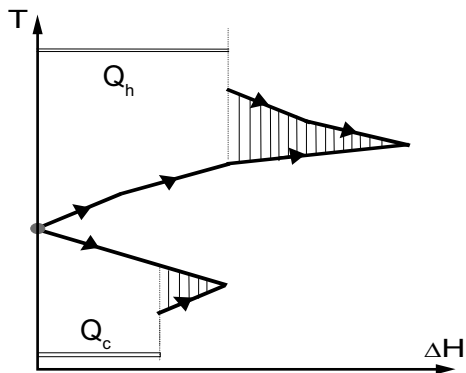


Рис. 6.8. Применение большой составной кривой для определения параметров энергоносителей

Но осуществлять размещение энергоисточников для технологической схемы легче на большой составной кривой, чем на составных кривых (Рис. 6.9). Мы можем легко указать температурный уровень, на который нужно разместить (ввести в систему) пар в качестве горячей утилиты при минимальном значении СР топочного газа.

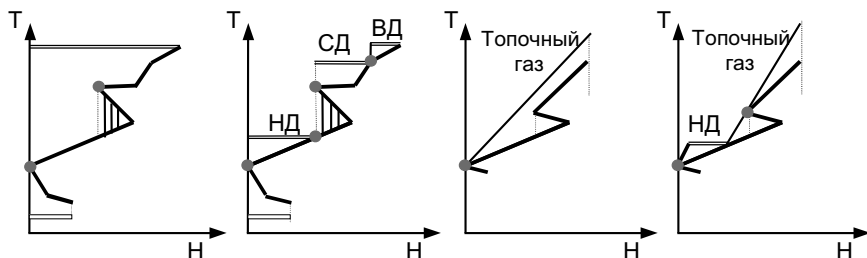


Рис. 6.9. Определение размещения утилит с помощью большой составной кривой

Посмотрим, как можно применить эти новые знания о построении большой составной кривой для решения проблем, с которыми мы столкнулись при представлении энергоносителей на составных кривых (раздел 5.1).

Можно более точно размещать энергоисточники с помощью большой составной кривой. Размещение энергоисточника при этом не мешает одновременно видеть составные кривые технологических потоков (Рис. 6.10).

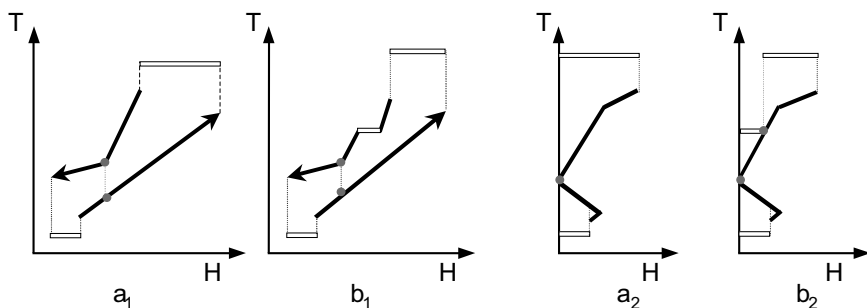


Рис. 6.10. Размещение энергоносителей на большой составной кривой: не нужно разрезать технологические составные кривые (решение проблемы 1)

Теперь понятно, почему ранее возникло столько сложностей с этим примером. Граничная точка «утилитного пинча» определена как точка над технологическим «пинчем». Это объясняет, почему у нас было нарушено значение $\Delta T_{\min}$ в варианте 3.

При применении большой составной кривой граничная точка четко задана на технологической составной кривой, поэтому не требуется итерационного определения минимального значения СР топочного газа (Рис. 6.5).

Таким образом, большие составные кривые по сравнению с ранее рассмотренными составными кривыми позволяют наиболее просто выбрать размещение утилит в технологической схеме и рассчитать параметры этих утилит (например, температуру подводимого энергоисточника) (Рис. 6.11).

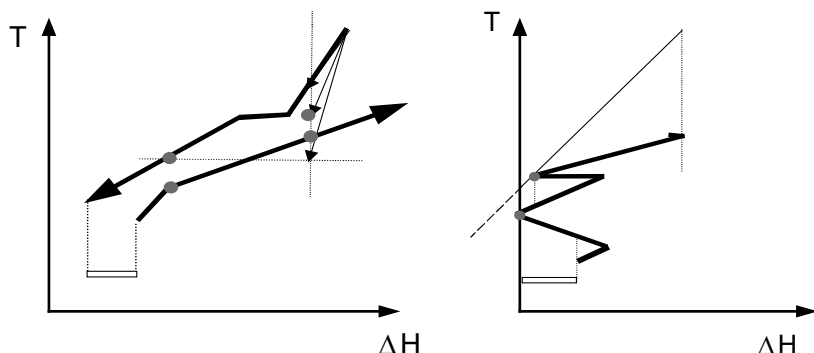


Рис. 6.11. Большая составная кривая позволяет рассчитать параметры энергоисточников (решение проблемы 2)

6.4 Области применения больших составных кривых

Теперь можно рассмотреть области применения больших составных кривых.

Большая составная кривая – это основной инструмент для определения мест введения в технологическую систему энергоносителей, а также процессов и аппаратов – внутренних энергопотребителей (ректификационных колонн, насосов, машин и т. д.)

Из Рис. 6.12 следует, что дополнительная рекуперация тепла в технологической системе возможна в заштрихованных областях большой составной кривой. В соответствии с принципом каскада имеющееся в распоряжении тепло достаточно велико, чтобы его можно было передавать в более низкотемпературные части технологической схемы.

В заштрихованных областях на большой составной кривой можно вполне использовать рекуперлируемую в системе энергию и не потреблять энергоносители. Эти области на большой составной кривой называются «карманами».

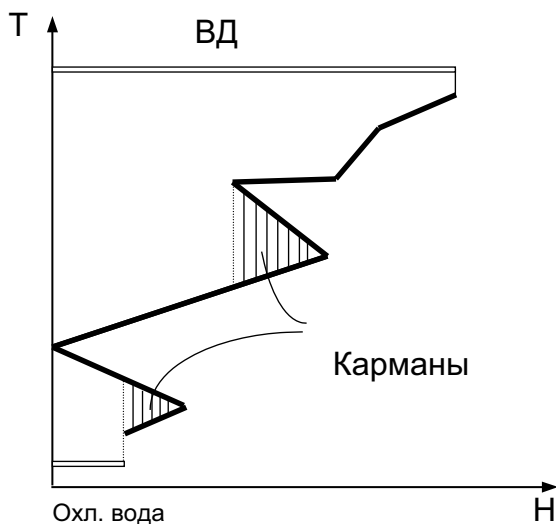


Рис. 6.12. Немонотонно возрастающие части большой составной кривой – карманы

Составные кривые для утилит отличаются от составных кривых технологических потоков. Таким образом, когда мы задаем температуры и нагрузки для утилит, то получаем большую составную кривую утилит (Рис. 6.13).

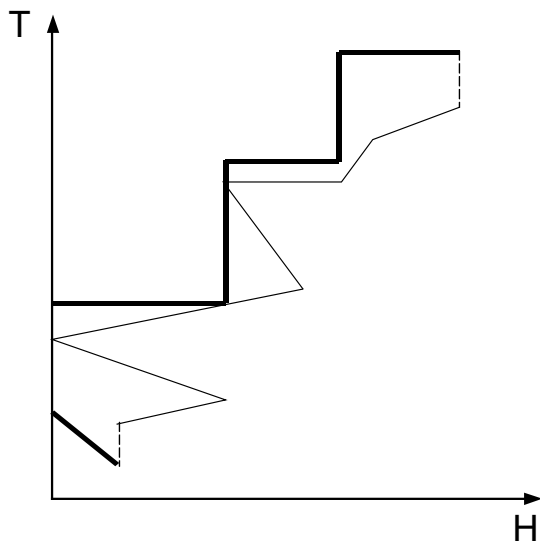


Рис. 6.13. Большая составная кривая для утилит

6.4 Области применения больших составных кривых

Энергоносители для технологической схемы также показаны при смещенных температурах. Реальная температура горячих энергоисточников сдвинута на $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ от $\Delta T_{\min}$ над интервальными температурами (Рис. 6.14).

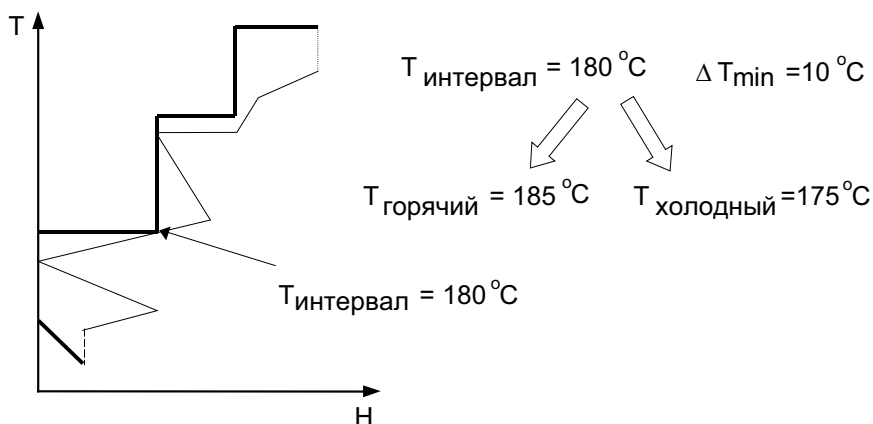


Рис. 6.14. Утилиты смещены в большой составной кривой утилит

На рис. 6.15 показана типовая система совместного (или комбинированного) генерирования пара и выработки механической энергии для перерабатывающего предприятия.

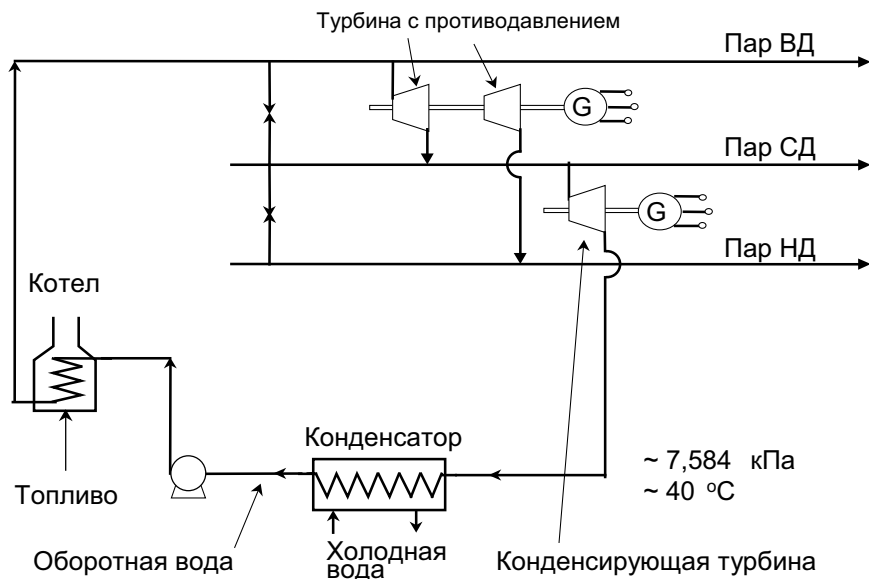


Рис. 6.15. Типичная схема системы генерирования пара на предприятии

Выходные давления для турбин с противодавлением устанавливаются требованиями технологического процесса, которые можно определить с применением пинч-метода на энтальпийной диаграмме (Рис. 6.16).

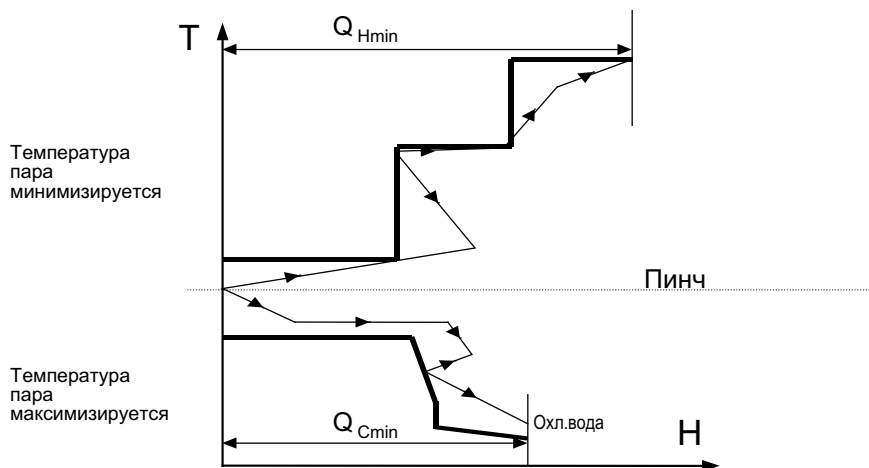


Рис. 6.16. Определение температурных уровней пара с помощью большой составной кривой

По графику больших составных кривых очень легко определить минимальные температуры потребляемого пара и максимальные температуры для его генерирования. Эти температуры задают в свою очередь давления, при которых можно максимизировать выработку механической энергии (работы) с помощью турбин обратного давления.

На практике в качестве утилит очень распространены горячие масляные циклы (Рис. 6.17). Минимизировать стоимостные показатели такого цикла можно путем минимизации температуры возврата масла.

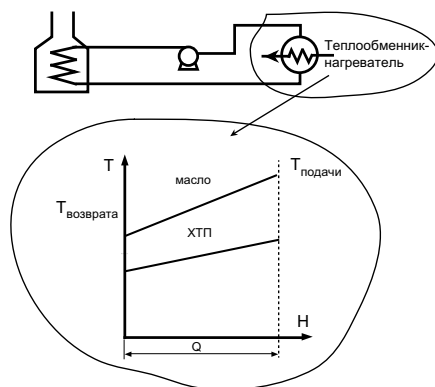


Рис. 6.17. Схема рециркуляции горячего масла

Печи, или топки, – еще один распространенный вид энергоисточников, особенно в нефтепереработке (Рис. 6.18). Технологический поток нагревается в змеевике печным газом (горячим воздухом топки). Нужно минимизировать потребление топлива и размер топки по мере того, как минимизируется расход печного газа и температура в дымоходе.

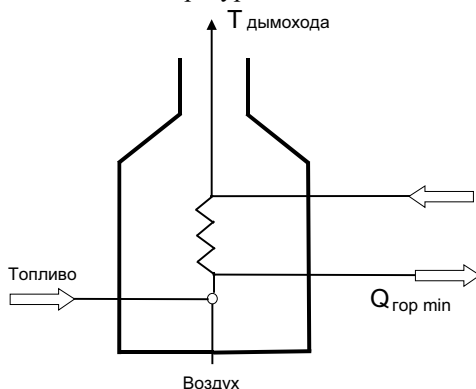


Рис. 6.18. Упрощенная схема печи

Лимитирующую температуру в дымоходе можно определить по большой составной кривой (Рис. 6.19).

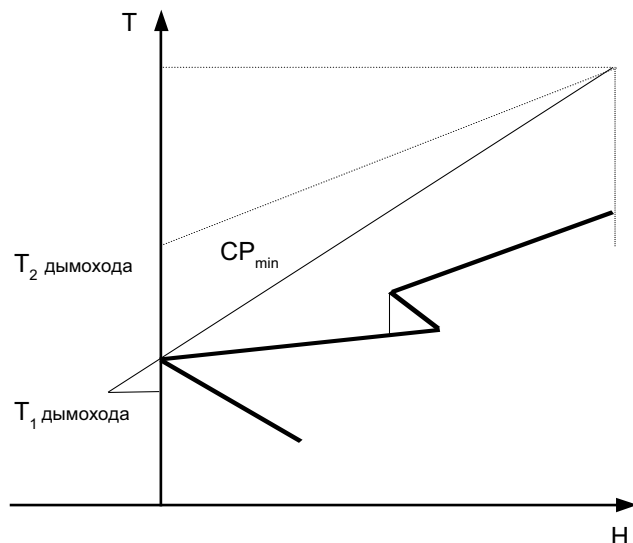


Рис. 6.19. Определение лимитирующей температуры при помощи большой составной кривой

Помимо рассмотренных видов горячих энергоисточников для технологической схемы часто требуются и холодные энергоисточники (охладители). Промышленные системы охлаждения имеют несколько уровней охлаждения (Рис. 6.20). Стоимость охлаждения является функцией температуры, и она оказывается очень высокой, если требуются очень низкие температурные уровни. Нашей целью, как потребителя холода, является максимальное использование холода, что приведет к уменьшению стоимости потребления

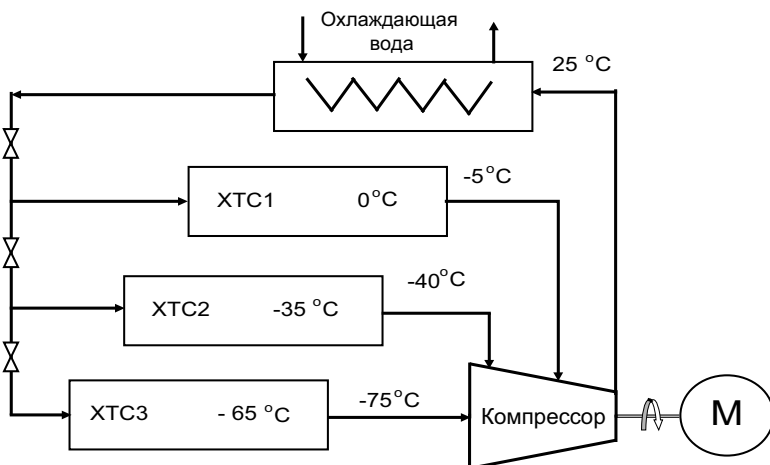


Рис. 6.20. Промышленная система охлаждения для предприятия

На рис. 6.21 показаны возможные температурные уровни охлаждения, определяемые с помощью большой составной кривой.

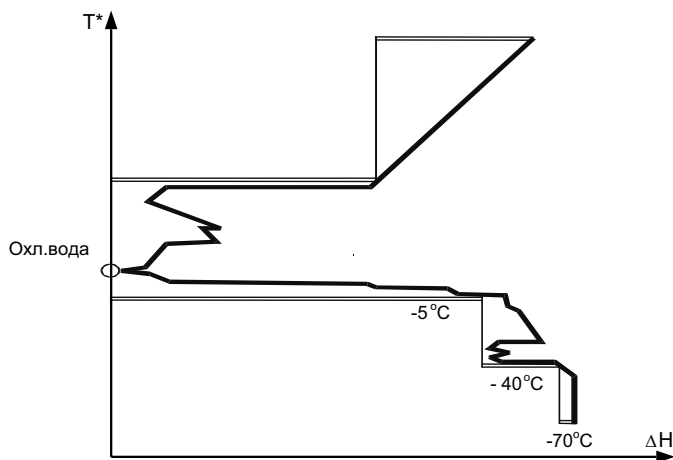


Рис. 6.21. Определение уровней охлаждения

Тепловые машины

Тепловая машина забирает тепло Q_1 от источника тепла, производит механическую энергию (работу) $W = Q_1 - Q_2$ и отдает тепло Q_2 при более низкой температуре потребителю (Рис. 6.22).

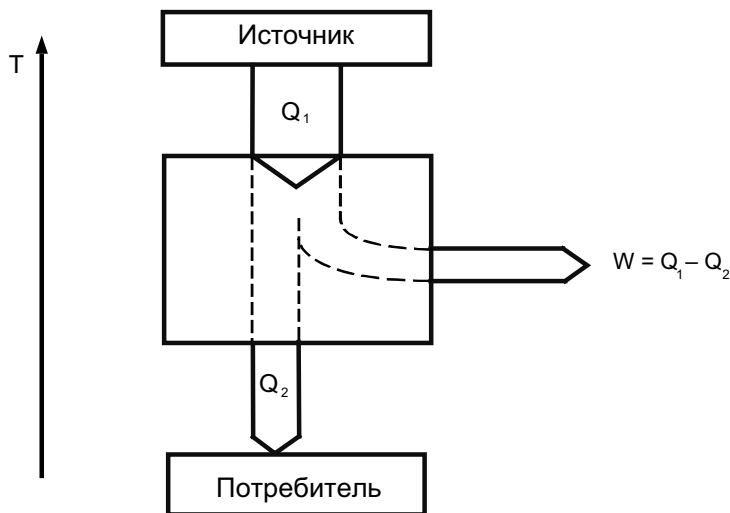


Рис. 6.22. Схема тепловой машины

Покажем, каким образом следует интегрировать тепловую машину с технологическим процессом. Рассмотрим тепловую машину, размещенную в подсистеме под пинчем (при более низкой температуре) и над пинчем (при более высокой температуре), т. е. через пинч-точку.

Рассмотрим интеграцию тепловой машины с технологической системой через пинч (Рис. 6.23). Тепловая машина забирает Q единиц тепла от энергоисточника над пинчем, производит W единиц механической работы и отдает $(Q - W)$ единиц тепла подсистеме над пинчем, которые впоследствии передаются каскадом охлаждающей воде. Таким образом, эффективность коэффициента полезного действия (КПД) тепловой машины, интегрированной в технологический процесс, не выше, чем эффективность (КПД) тепловой машины, работающей независимо от технологического процесса. Более того, мы теряем энергию и увеличиваем капитальные затраты. Происходит это потому, что мы передаем тепло на выходе $(Q - W)$ большее, чем необходимо, а также потому, что нам нужно было бы отобрать всю энергию до точки конденсации, чтобы генерировать больше энергии (вместо этого мы теряем этот дополнительный расход энергии).

Попробуем интегрировать тепловую машину в области над пинчем (Рис. 6.24). Мы отдаем $(Q - W)$ единиц в область технологической си-

системы, которая является потребителем тепла. Теперь мы можем уменьшить количество энергоисточника на $(Q - W)$ единиц. Для поддержания энергетического баланса нам необходимо еще W единиц тепла для производства механической работы. Таким образом, мы достигаем 100% превращения тепла в работу.

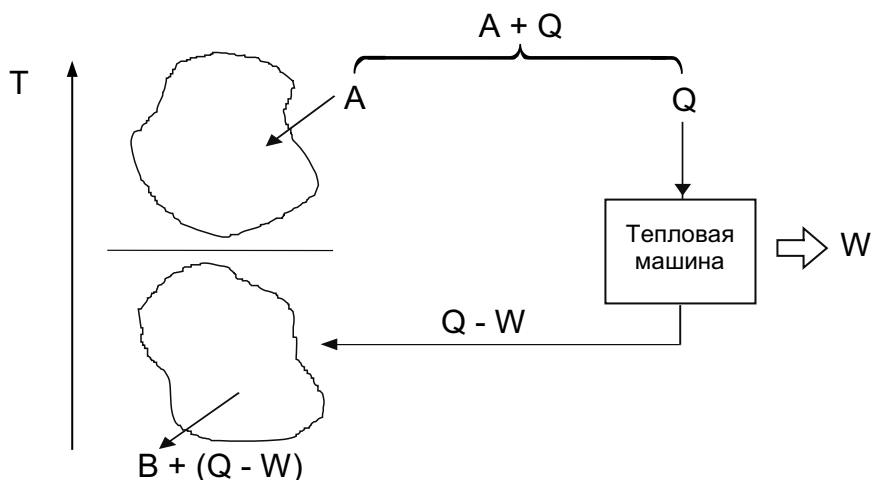


Рис. 6.23. Размещение тепловой машины через пинч

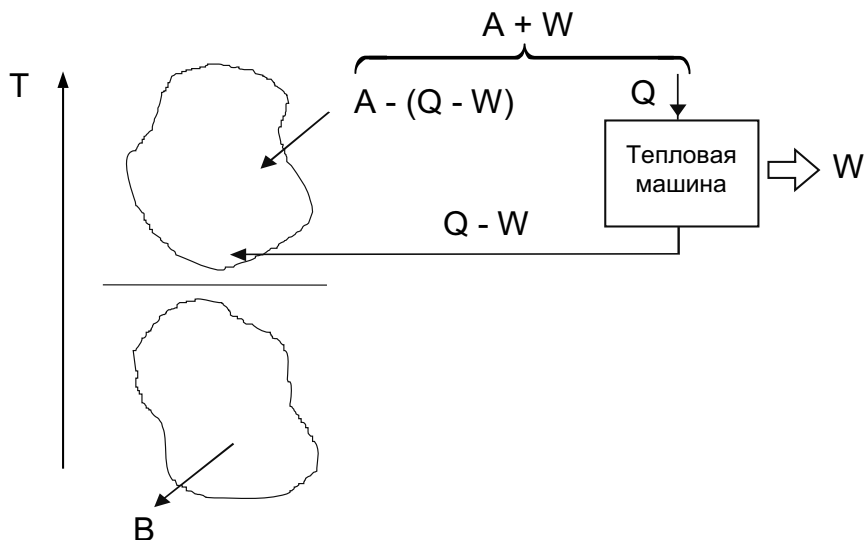


Рис. 6.24. Размещение тепловой машины в подсистеме над пинчем

Если мы используем область под пинчем в качестве источника тепла для тепловой машины, то мы можем произвести механическую работу без увеличения потребления горячего энергоисточника.

Дополнительно к достижению 100 %-ного превращения технологического тепла в энергию, мы также экономим W единиц тепла энергоисточника, как это происходит, например, при размещении паровой турбины в технологической системе (Рис. 6.25).

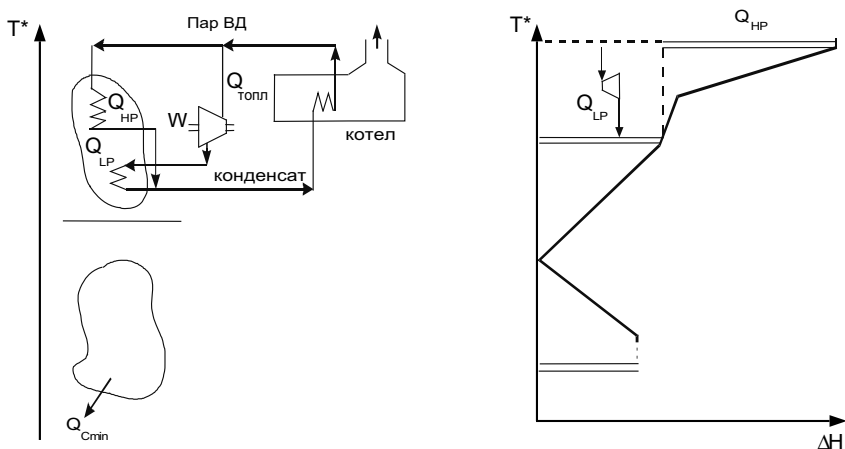


Рис. 6.25. Пример размещения паровой турбины в технологической схеме с использованием большой составной тепловой кривой

Таким образом, можно сформулировать основное правило размещения тепловых машин в технологической схеме: места размещения тепловых машин внутри технологической схемы на большой составной кривой не должны пересекать пинч-точку.

Как определить приемлемые уровни отдачи тепла и тепловые нагрузки? Необходимо помнить, что для задания целевых значений энергии нужно использовать технологическую большую составную тепловую кривую и рассматривать **тепловую машину** как **энергоисточник (горячую утилиту)** для технологической системы.

Рассмотрим еще раз размещение паровой турбины (Рис. 6.25). Топливо, подающееся в котел, используется для получения пара ВД (A единиц), для нагревания в технологической системе и для генерирования механической энергии (W единиц) в турбине. Отдаваемое турбиной тепло (B единиц) также используется для нагревания в системе.

Мы можем определить приемлемые уровни пара и их нагрузки с помощью большой составной кривой, и, таким образом, значения A , B , и W . Единственная дополнительная потребность в топливе – это

возмещение потерь тепла с выбросами в атмосферу. При таком использовании тепла увеличение потребления топлива приведет к эквивалентному увеличению производства энергии (если потери тепла в атмосферу те же).

Теперь рассмотрим еще один вид тепловой машины – газовую турбину (Рис. 6.26). Топливо обеспечивает тепловую нагрузку для предварительного нагревания (B единиц), тепловую нагрузку для технологического процесса (A единиц) и механическую работу (W единиц). Увеличение потребления горючего ведет к непосредственному увеличению производимой механической работы (при условии, что потери тепла в атмосферу – те же).

Существуют несколько видов тепловых машин: паровые турбины, газовые турбины, поршневые машины, комбинированные термодинамические циклы и т. д.

У всех тепловых машин есть источники тепла и потребители тепла. Рассмотрим два примера использования БСК для выбора внешнего источника энергии.

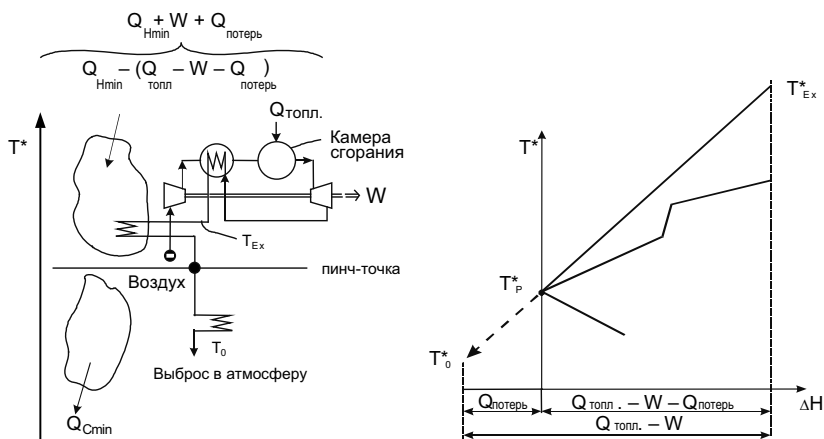


Рис. 6.26. Пример размещения газовой турбины в технологической схеме с использованием большой составной кривой

На рисунке 5.27 изображена большая составная кривая некоторой технологической системы. Отметим, что даже при высоких температурах потребность в тепле холодных потоков может быть удовлетворена при помощи тепла технологических потоков (заштрихованная область рекуперерирует тепло). Пар можно использовать для оставшегося плоского участка при температурах, достигаемых при помощи пара.

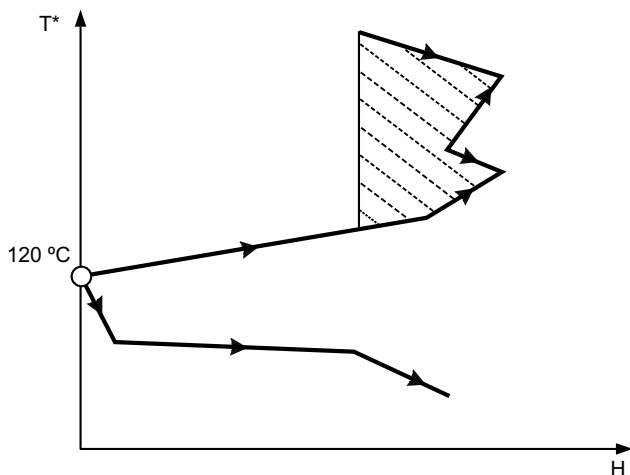


Рис. 6.27. Большая составная кривая некоторой технологической системы

Таким образом, для данной системы требуется паровая турбина (Рис. 6.28).

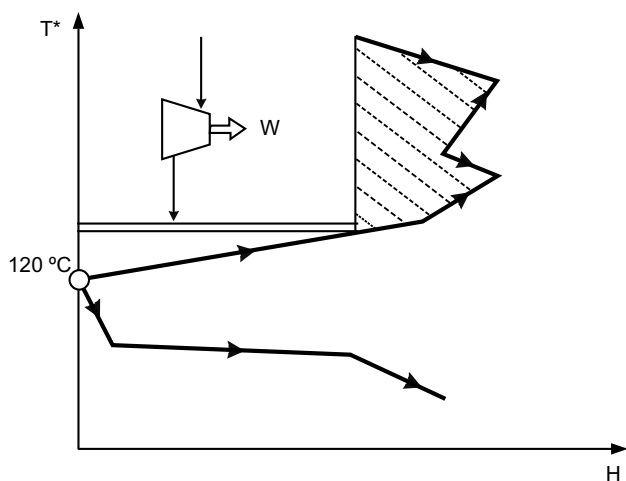


Рис. 6.28. Размещение паровой турбины

Ещё пример большой составной кривой некоторой технологической системы. Для неё также нужно выбрать тепловую машину (Рис. 6.29).

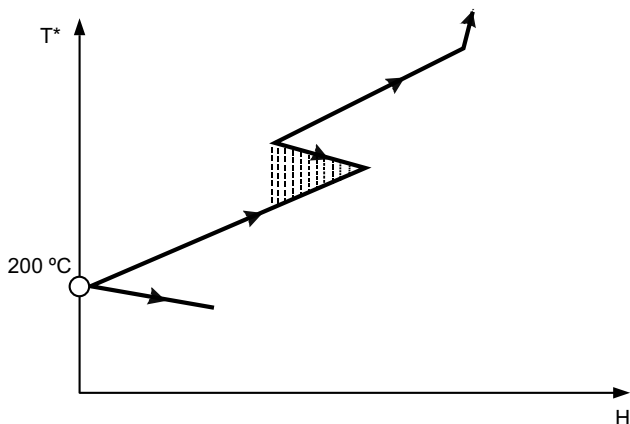


Рис. 6.29. Большая составная кривая некоторой технологической системы

В данном примере пинч все еще находится в области, в которой допустимо применение паровых турбин. Но разумно ли это в данном случае?

Самая высокая температура здесь требует применения газовой турбины (Рис. 6.30).

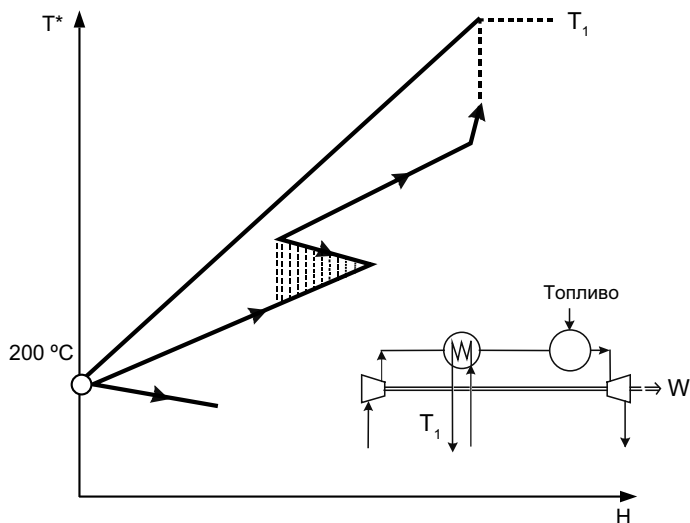


Рис. 6.30. Размещение газовой турбины в технологической системе

Тепловые насосы

Тепловой насос потребляет Q_1 единиц тепла из низкотемпературного источника, использует W единиц механической работы и отдает $Q_2 = Q_1 + W$ единиц тепла высокотемпературному потребителю тепла (Рис. 6.31).

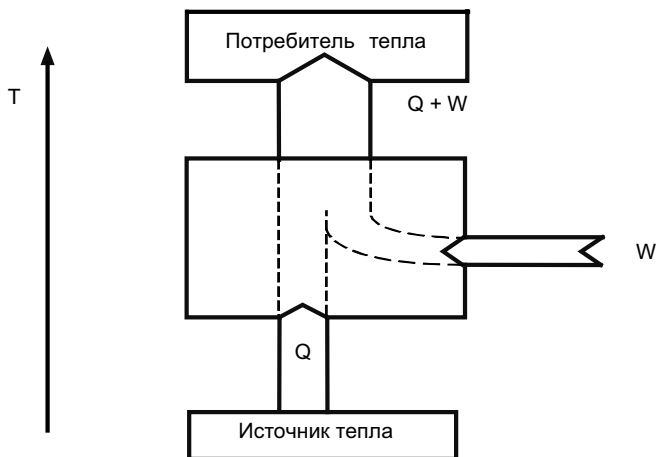


Рис. 6.31. Схема теплового насоса

Определим местоположение теплового насоса при размещении его в технологической системе (Рис. 6.32).

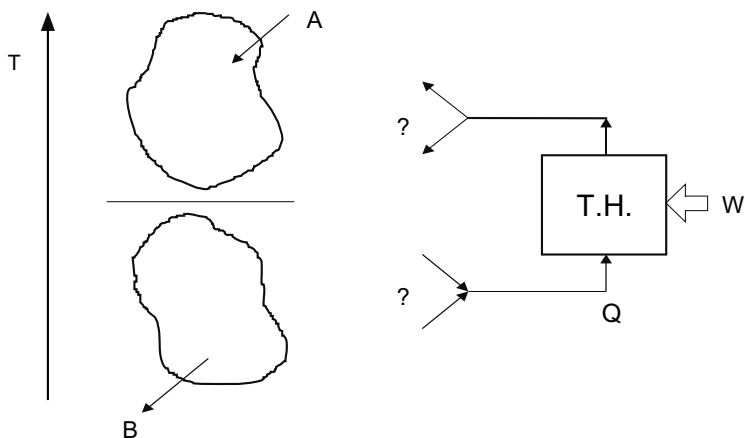


Рис. 6.32. Размещение теплового насоса в технологической системе

Рассмотрим вначале положение теплового насоса в области над пинч-точкой (Рис. 6.33).

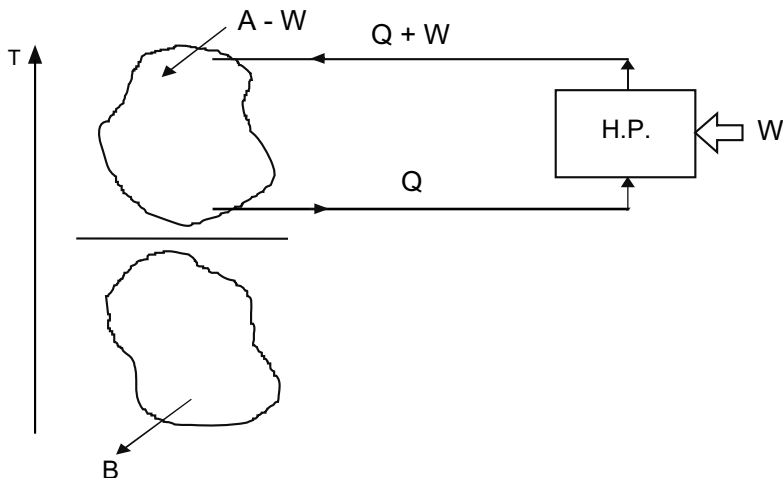


Рис. 6.33. Размещение теплового насоса в области над пинч-точкой

Мы берем Q единиц тепла от технологической системы над пинчем и отдаем обратно $Q + W$ единиц в область системы над пинчем. В результате мы можем уменьшить потребление горячего энергоисточника (A единиц) на W единиц. Кажется, что мы сэкономили энергию, но нам пришлось купить W единиц электричества. В целом, общее количество тепла в технологической системе не изменилось ($A - W + W = A$), но счет за расход электричества у нас окажется больше.

Попробуем разместить тепловой насос в области под пинч-точкой (Рис. 6.34).

Мы забираем Q единиц тепла из области технологической системы под пинчем и отдаем $Q + W$ единиц обратно в область под пинчем. Теперь у нас не уменьшается потребление горячего энергоисточника. Вместо этого W единиц энергии добавляется к той области, которая уже была источником тепла. Таким образом, мы используем дорогое электричество для охлаждающей воды.

Из сказанного следует, что единственно правильным размещением теплового насоса является размещение через пинч-точку (Рис. 6.35).

Q единиц тепла забирается из области под пинчем (источника тепла) и $Q + W$ единиц возвращается в область над пинчем (потребитель тепла). В результате снижается потребность в горячих и холодных утилитах.

Таким образом, для задания целевых значений энергии нужно использовать технологическую большую составную кривую и рассматривать тепловой насос как энергоисточник (горячую утилиту).

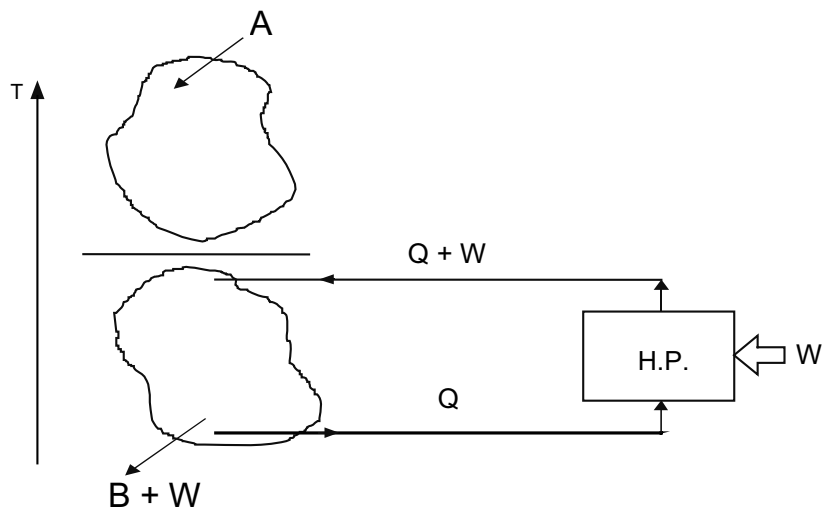


Рис. 6.34. Размещение теплового насоса в области технологической системы под пинч-точкой

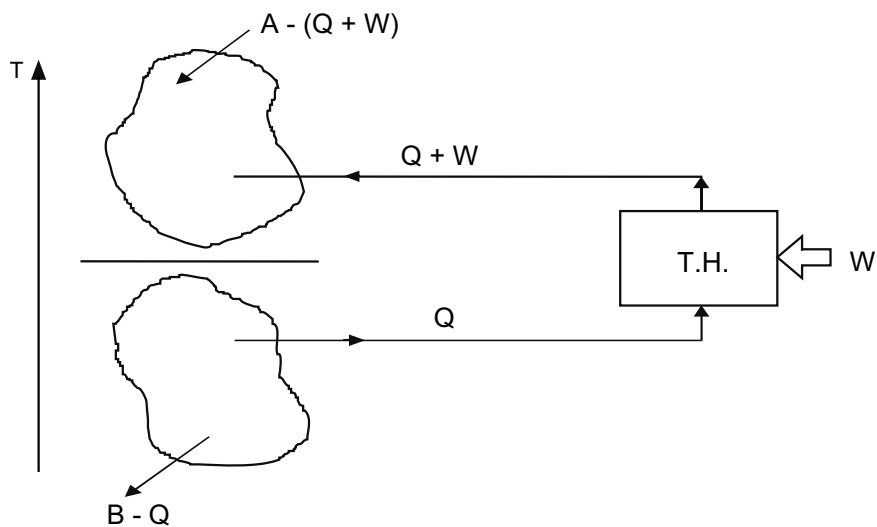


Рис. 6.35. Размещение теплового насоса через пинч-точку

Размещение теплового насоса может оказаться особенно эффективным в случаях, когда в технологической системе существует избыток механической энергии, а также когда существует возможность использовать дешевую электроэнергию. Эти виды энергии могут быть очень эффективно использованы для для экономии как на нагревании, так и на охлаждении.

Наиболее целесообразным и эффективным размещение теплового насоса оказывается, когда большая составная кривая технологической системы имеет форму острого клюва, так как в этом случае существуют большие тепловые нагрузки выше и ниже пинч-точки, а также небольшая минимальная разность температур.

ГЛАВА VII

ПИНЧ-МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ

7.1 Существующие методы реконструкции теплообменных систем

Системы теплообменников (СТ) обладают высокой эксплуатационной гибкостью, однако некоторые структурные изменения бывают настолько серьезными, что требуется полная реконструкция, или модернизация, всей СТ. Эти изменения могут включать в себя устранение «узких мест», улучшение рекуперации энергии в технологической системе или изменение свойств потоков питания или продуктов. Во всех этих случаях целью реконструкции является разработка оптимального проекта модернизации СТ, при заданных проектных и эксплуатационных ограничениях, которые подходят для новых эксплуатационных условий.

Обычно существует несколько альтернативных проектных решений по реконструкции действующей СТ, и выбор оптимального варианта из множества альтернатив является важной составной частью проектирования. Теоретически, оптимальный вариант проекта СТ – это проект с минимальными общими затратами, которые состоят из затрат на дополнительную площадь поверхности теплообмена и затрат на структурные изменения (например, перенаправление потоков или изменение местоположения теплообменников). Однако на практике, на этапе проектирования СТ общие затраты невозможно рассчитать точно, поэтому приходится применять различные методы оценки стоимости. Из-за допущений, которые приходится вводить для расчета стоимостных оценок, оказывается, что эти оценки являются слишком грубыми, чтобы с их помощью можно было надежно выявить оптимальный вариант реконструируемой СТ.

Еще одним ограничением при использовании стоимостных оценок является то, что с их помощью не возможно описать качественные проектные параметры, такие как безопасность и управляемость. Поэтому

требуется инженерный опыт для оценки вариантов проектов реконструкции СТ на основе таких критериев.

Таким образом, для реконструкции СТ очень желательным является разработка интерактивной процедуры проектирования, которая позволяла бы проектировщику осуществлять постоянный контроль и своевременно вносить коррективы в разрабатываемый проект.

Существующие методы реконструкции СТ применяют либо пинч-метод, либо методы математического программирования.

При использовании пинч-метода процедура проектирования состоит из двух этапов: этапа определения целевых значений и этапа проектирования. Основное преимущество использования этого метода заключается в интерактивном характере процедуры проектирования. К недостаткам следует отнести длительные ручные процедуры расчета, а также возможность генерирования слишком сложных вариантов проекта, из-за неявного учета стоимостных критериев при расчете.

С применением методов математического программирования задача проектирования оптимальной СТ обычно решается смешанная дискретно-непрерывная задача линейного программирования (MILP) или реже нелинейного программирования (MINLP). К преимуществам подобных методов следует отнести возможность автоматизации расчетов, а к недостаткам – ограниченные возможности для активного участия проектировщика. Кроме того, хотя методы математического программирования используют для минимизации стоимостные критерии, они не учитывают два существенных момента. Во-первых, дополнительная площадь теплообмена в этих методах рассматривается только как дополнительные единицы теплообменников, добавляемых в структуру СТ, хотя на практике можно заменить существующие трубы и трубные решетки в теплообменниках более компактными конструкциями и/или использовать приспособления для интенсификации процесса теплообмена. Во-вторых, в методах математического программирования стоимость перемещения теплообменников и нового подсоединения труб к ним принимается одинаковой, независимо от расстояния, на которое переносят теплообменник и сложности изменения его обвязки.

Из сказанного выше становится ясно, что до сих пор не существовало автоматизированных интерактивных методов реконструкции промышленных СТ.

7.2 Теоретические основы пинч-метода реконструкции теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

Ограничения в структуре теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

В большинстве случаев степень рекуперации теплоты в СТ можно повысить за счет добавления дополнительной площади поверхности к некоторым теплообменникам СТ. Однако на практике часто отмечают, что когда дополнительная площадь добавляется без изменения структуры СТ, это увеличение площади не дает ожидаемого результата. Такие особенности СТ дают основание предположить наличие предела рекуперации теплоты для данной структуры СТ. Проиллюстрируем это, используя графики составных кривых.

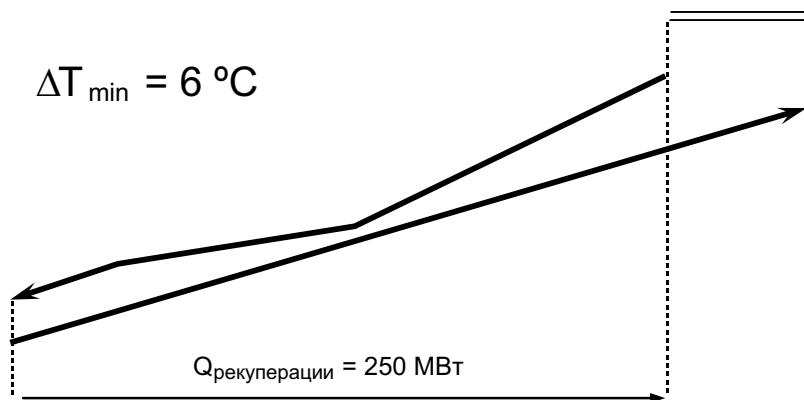


Рис. 7.1 Условия максимальной рекуперации тепла для данной теплообменной системы

Составные тепловые кривые на рис. 7.1 указывают, что максимально возможное значение рекуперированного тепла в данной СТ равно 250 МВт. Однако, как видно из рис. 7.2, при данной структуре СТ максимальная величина рекуперации тепла может быть лишь 220 МВт, независимо от того, сколько дополнительной площади теплообмена вводится в систему. Если изменить структуру СТ, как это показано на рис. 7.3, то можно достичь рекуперации тепла в 235 МВт, что превосходит предельное значение рекуперированного тепла ($R_{\max}$) в исходной структуре (220 МВт). Отсюда видно, что предел рекуперированного тепла $R_{\max}$ связан со структурой СТ. Если

осуществить наложение СТ (рис. 7.4) при $R_{\max}$ на составные кривые, как показано на рис. 7.5, то каждая жирная линия представляет собой температурный профиль горячего потока в теплообменнике. Когда одна из этих жирных линий соприкасается с холодной составной кривой, минимальная разность температур между горячими и холодными потоками в данном теплообменнике оказывается равной 0°C , и пара потоков в этом теплообменнике называется пинч-парой потоков.

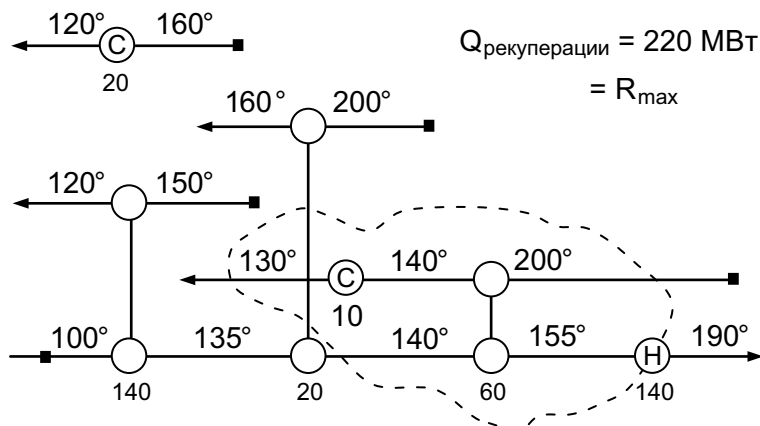


Рис. 7.2 Условия максимальной рекуперации тепла для данной теплообменной системы

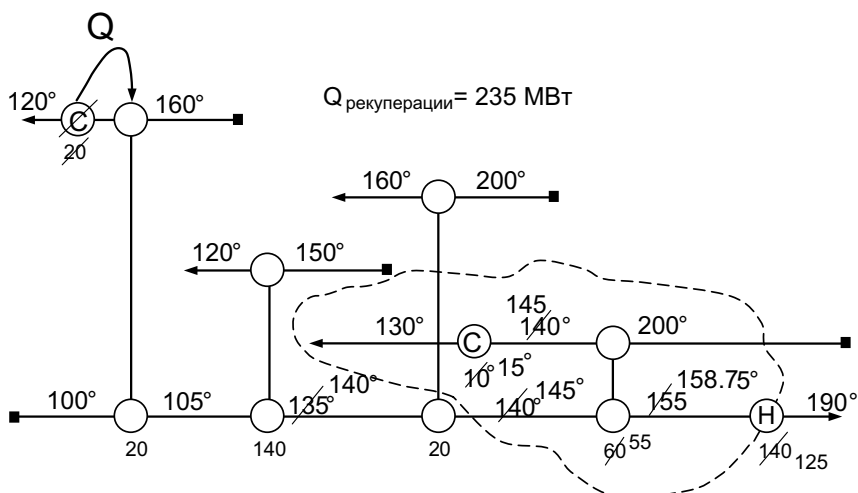


Рис. 7.3. Воздействие структурных изменений на ограничения по рекуперации тепла в теплообменной системе

7.2 Теоретические основы пинч-метода реконструкции теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

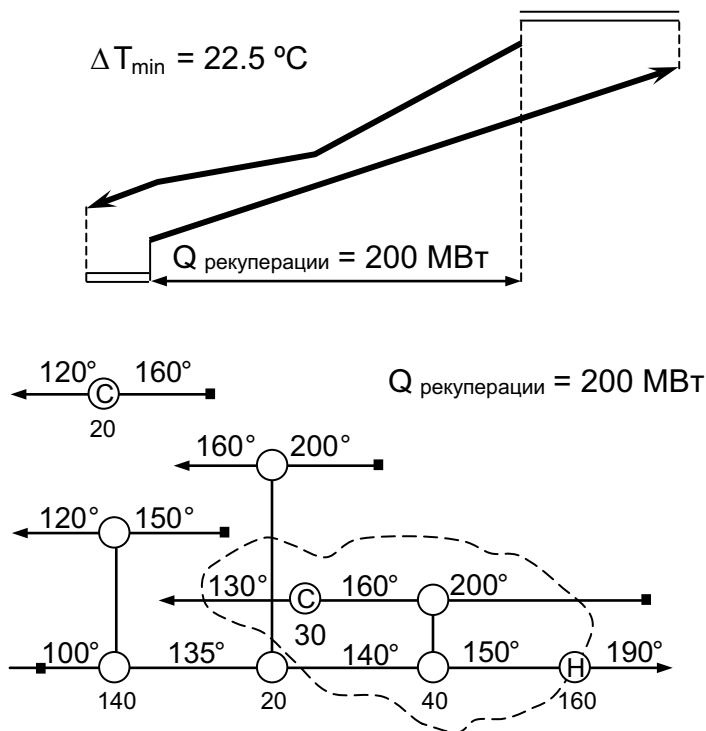


Рис. 7.4. Сеточная диаграмма исходной теплообменной системы

Таким образом, пинч-пара потоков – это холодный и горячий потоки в одном теплообменнике, разность температур между которыми стремится к предельному значению по мере увеличения степени рекуперации тепла. Хотя в данном примере разность температур была принята равной $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, она может быть любым положительным числом. Пинч-пары потоков указывают на наличие пинча СТ, который является «узким местом» данной СТ (Рис. 7.6).

Определение пинч-точки теплообменных систем

«Пинч-точка» или «пинч» на составных тепловых кривых СТ делит СТ на область с недостатком тепла – потребитель тепла и область с избытком тепла – источник тепла, по аналогии с хорошо известной пинч-точкой технологических потоков в технологической системе. Кроме того, при заданной минимальной разности температур между холодными и горячими потоками пинч СТ определяет предел рекуперации тепла для СТ данной

7.2 Теоретические основы пинч-метода реконструкции теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

Важно отметить, что пинч СТ не зависит от установленной площади теплообмена в данной СТ, поэтому любые изменения в площади поверхности теплообменников не влияют на положение пинча СТ. Можно, однако, показать, что пинч СТ определяет потребность в минимальной площади поверхности теплообмена СТ.

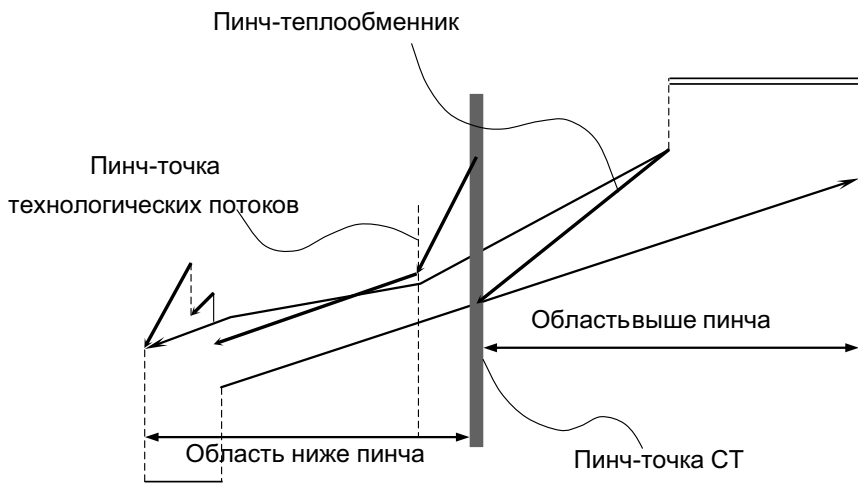


Рис. 7.6. Определение пинч-точки теплообменной системы на составных тепловых кривых

Пинч СТ применяется только для проектов реконструкции действующих СТ.

Кривые целевых значений для реконструируемых теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

Кривые целевых значений (или значений целевых функций) для проекта реконструкции дают графическое представление компромисса «капитальные затраты – энергия» при проектировании реконструируемой СТ (рис. 7.7). Различные целевые значения площади поверхности теплообмена при реконструкции СТ можно получить с использованием существующего метода пинч-анализа. Однако чтобы добиться реализации этих целевых значений в конкретном проекте реконструкции, может потребоваться значительная модификация исходной структуры действующей СТ. В ситуациях, когда структуру СТ нельзя изменять,

найденные целевые значения оказываются бесполезными. В этом случае целевые значения для «нулевых структурных изменений» можно определить как минимальную дополнительную площадь поверхности теплообмена, требуемую для достижения возможной рекуперации тепла без изменения структуры СТ.

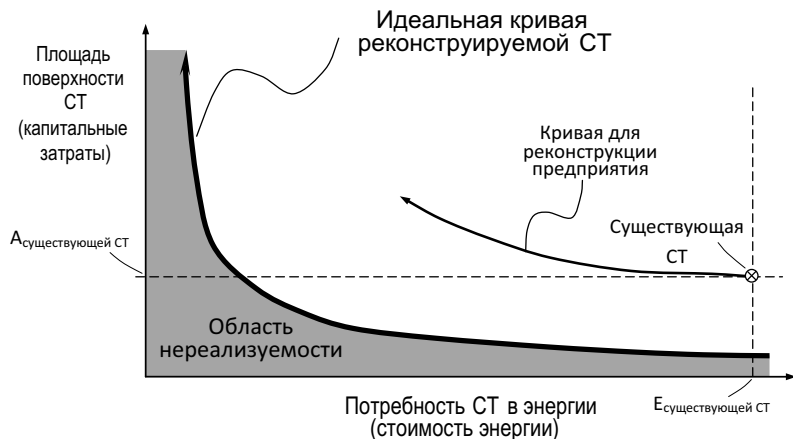


Рис 6.7. Кривые целевых значений реконструируемых теплообменных систем предприятия

Хотя для определения целевых значений характеристик реконструируемой СТ с «нулевыми структурными изменениями» требуются оптимизационные процедуры со множеством итераций, на качественном уровне можно построить соответствующую кривую целевых значений для проекта реконструкции при известной степени рекуперации тепла $R_{\max}$. По определению, кривая целевых значений начинается в точке, в которой поверхность теплообмена и степень рекуперации тепла равны значениям исходной СТ, а заканчивается в точке, в которой значение площади поверхности равно бесконечности, а величина рекуперации тепла равна $R_{\max}$ для данной структуры СТ. Зная эти две точки, можно построить примерный график кривой реконструкции, как показано на рис. 7.8 для рассматриваемого примера.

Если внести единственное изменение в структуру СТ, то увеличивается возможность рекуперации тепла и можно превысить предел рекуперации тепла $R_{\max}$ исходной СТ. Это приводит к тому, что появляется новый и больший $R_{\max}$, а также новый набор пинч-пар потоков. Целевое значение реконструкции с единственным изменением в структуре определяет минимальную дополнительную площадь поверхности теплообмена, требуемую для достижения возможной рекуперации тепла. Как видно из рис. 7.8, компромисс между дополнительной пло-

7.2 Теоретические основы пинч-метода реконструкции теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

щадь и экономией энергии улучшается, когда допустимы изменения в структуре СТ.

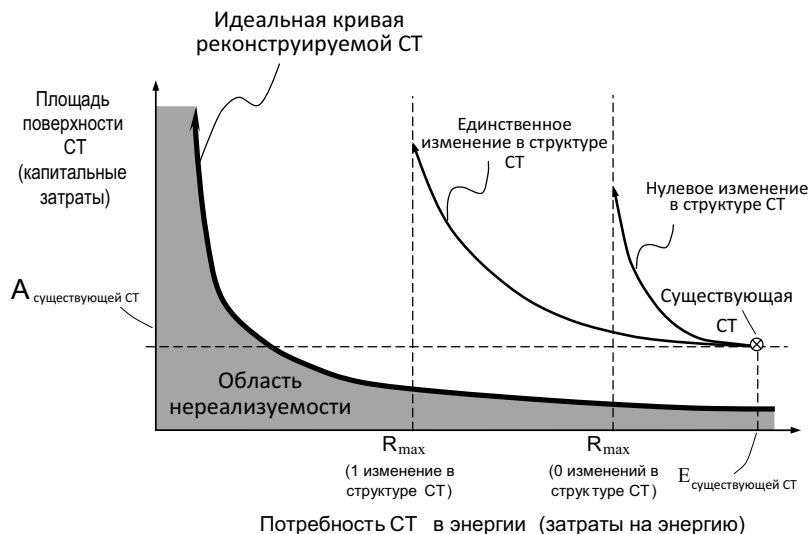


Рис. 7.8. Кривые изменения целевых значений для реконструированных СТ

Кривые целевых значений реконструируемой СТ для любого числа изменений в структуре СТ определяются аналогично (рис. 7.9).

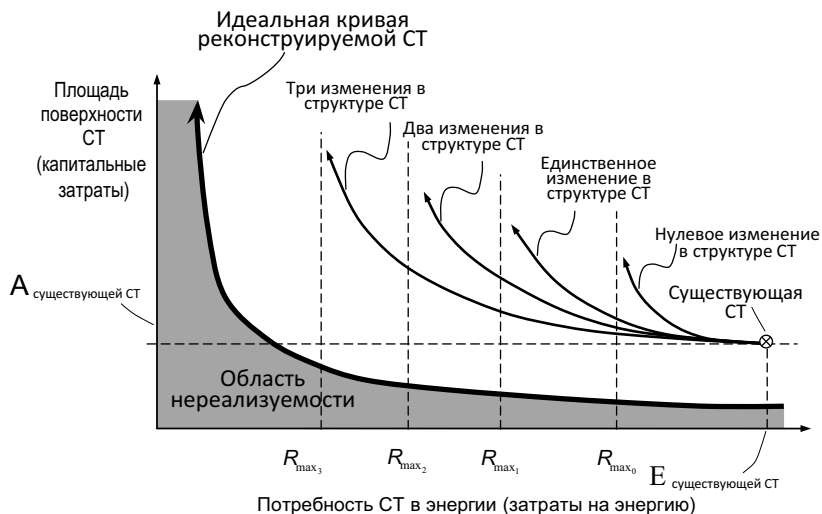


Рис. 7.9. Кривые целевых значений реконструированной СТ со множеством изменений в структуре

Устранение пинча теплообменной системы

Можно вносить различные изменения в СТ: изменение обвязки теплообменников, добавление новых теплообменников в СТ, разделение потоков внутри СТ.

Общее правило для определения структурных изменений при реконструкции СТ, ведущих к устранению пинча СТ состоит в том, что эти изменения должны способствовать перемещению тепла из области, находящейся ниже пинча СТ, в область, находящуюся выше пинча в СТ. Поскольку область, лежащая выше точки пинча СТ, обладает избытком тепла, то любое изменение структуры СТ, которое дает возможность осуществления теплообмена в области ниже пинча СТ, не увеличит степень рекуперации тепла $R_{\max}$ структуры. Аналогично, любое изменение структуры СТ, которое дает возможность осуществления теплообмена в области выше пинча СТ, также не увеличит $R_{\max}$ структуры.

Это правило является удобным инструментом для отыскания и исключения вариантов, которые не могут улучшить рекуперацию тепла в СТ.

Выбор изменений структуры при реконструкции теплообменной системы

Для реконструкции СТ нужно рассмотреть все типы структурных изменений СТ, которые включают изменение месторасположения теплообменников в технологической схеме, ввод дополнительных теплообменников и разделение потоков. Каждое из этих структурных изменений приводит к различным компромиссам между степенью рекуперации тепла и потребностями в площади поверхности теплообмена, и для каждого из этих структурных изменений можно построить свою кривую целевых значений при реконструкции. На рис. 7.10 показана кривая целевых значений для реконструируемой СТ с единственным изменением структуры, и, по определению, она образует нижнюю границу для всех кривых целевых значений реконструируемых СТ с разным количеством изменений в структуре СТ. Как видно из рис. 7.10, кривая целевых значений для реконструируемой СТ, которая минимально отклоняется от кривой с единственным изменением структуры, обладает наибольшими возможностями рекуперации тепла. Поскольку этот вариант структуры максимизирует степень рекуперации тепла и минимизирует штрафную функцию общей площади поверхности теплообмена, её можно выбрать как наиболее рациональный вариант структурных изменений СТ. У этого метода определения и выбора структурных изменений СТ имеется ряд преимуществ.

7.2 Теоретические основы пинч-метода реконструкции теплообменных систем с использованием действующих теплообменников

Поскольку этот метод не базируется на минимизации стоимости, для него не требуются стоимостные оценки в начале проектирования и сложные и долгие процедуры генерирования таких стоимостных оценок для всех возможных структурных изменений СТ. Хотя отсутствие минимизации стоимости приводит к тому, что конечный проект реконструкции СТ может и не быть проектом с минимальной стоимостью, всегда есть гарантия того, что сгенерированные с помощью данного метода варианты реконструкции являются вариантами с низкой стоимостью. Кроме того, данный метод минимизирует количество структурных изменений, а поскольку на стоимость реконструкции часто основное влияние оказывает стоимость именно структурных изменений СТ, то этот метод позволяет уменьшить общие затраты на реконструкцию.

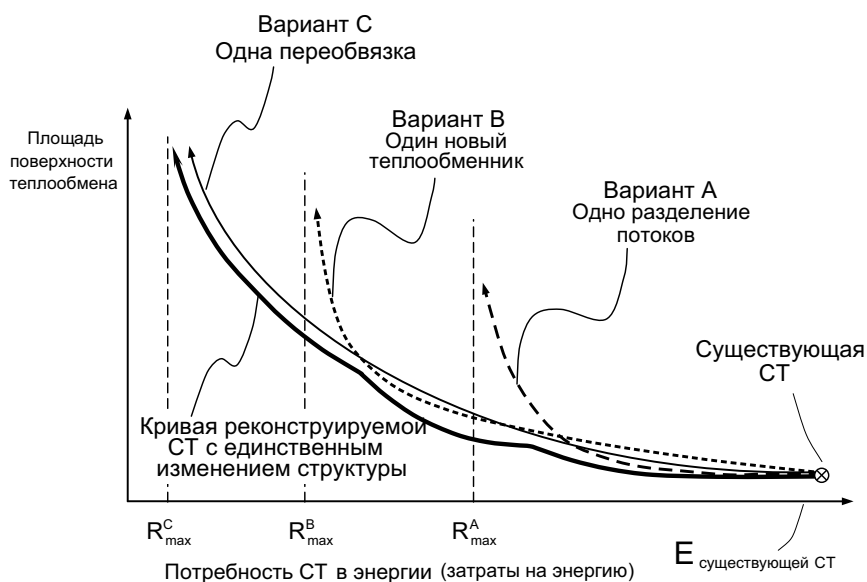


Рис. 7.10. Реконструируемая СТ с одним изменением структуры

Еще одним преимуществом данного метода является то, что он на рациональной основе отделяет выбор структурных изменений СТ от проектирования остальной части СТ. Данную процедуру выбора можно автоматизировать, но при этом у разработчика сохраняется полный контроль над процессом проектирования.

Определение возможности разделения потоков в теплообменной системе

Как было указано ранее, разделение потоков может увеличить степень рекуперации тепла ($R_{\max}$) в СТ данной структуры. Это значит, чтобы увеличить рекуперацию тепла, разделение потоков должно привести на составных тепловых кривых СТ к перемещению тепла из области, находящейся ниже пинча СТ в область, лежащую выше пинча СТ. Однако, это лишь указывает на то, что разделение потоков является возможным вариантом структурных изменений СТ, в то время как разделение потоков может быть самым многообещающим структурным изменением СТ.

Пинч-метод указывает на необходимость разделения потоков в структуре СТ на основе данных о множестве технологических потоков и отношений их теплоемкостей в технологическом пинче на составных тепловых кривых. Это оказывается возможным потому, что температурные движущие силы между горячими и холодными потоками минимальны вблизи технологического пинча, а разделение потоков обеспечивает соблюдение условия ΔT . Разделение потоков оказывается полезным и в случае, когда оно применяется к теплообменникам, расположенным в области пинча СТ.

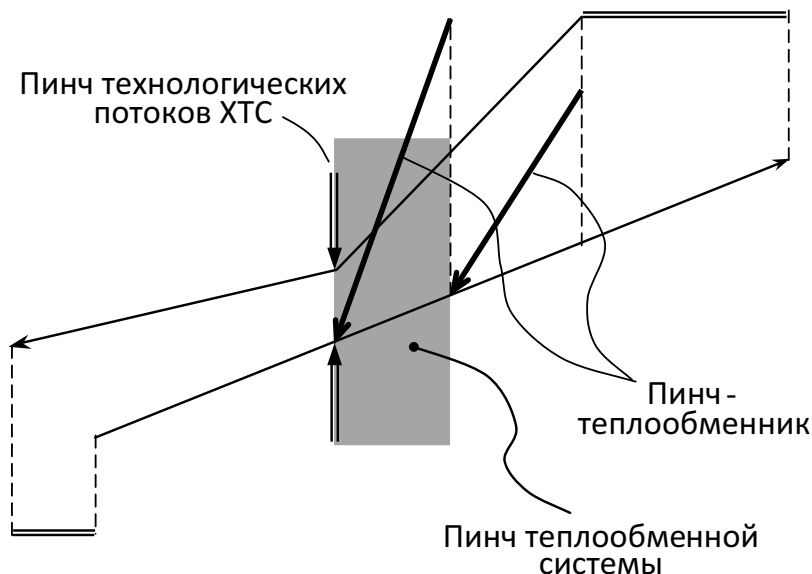


Рис. 7.11. Отображение на составных тепловых кривых эвристического правила разделения массовых расходов (энтальпий) потоков

7.3 Комплексный алгоритм оптимальной реконструкции теплообменной системы с использованием действующих теплообменников

Когда с использованием пинч-метода анализируют структуру СТ при $R_{\max}$ для одной и той же степени рекуперации тепла, пинч технологических потоков и пинч СТ часто оказываются в разных областях СТ. По этой причине пинч-точка технологических потоков и пинч СТ указывают на разные потоки, которые необходимо разделить. Однако когда обе пинч-точки совпадают, они указывают на одни и те же потоки, которые нужно разделить. В этом случае, разделение массовых расходов потоков в технологической системе с экономической точки зрения оказывается наиболее эффективным вариантом реконструкции СТ. Таким образом, можно сформулировать следующее эвристическое правило разделения массовых расходов (или энтальпий) потоков в пинче СТ:

Когда наблюдается совпадение пинч-точек технологических потоков и СТ, наиболее эффективным вариантом реконструкции СТ будет вариант разделения массовых расходов (энтальпий) потоков.

Графическое представление этого эвристического правила показано на составных тепловых кривых (рис. 7.11).

7.3 Комплексный алгоритм оптимальной реконструкции теплообменной системы с использованием действующих теплообменников

Комплексный алгоритм оптимальной реконструкции СТ, использующий понятие «пинч-точки» СТ, состоит из двух этапов: этапа диагностики и этапа оптимизации (рис. 7.12). Этап диагностики действующей СТ используется для определения и выбора оптимальных структурных изменений, которые необходимо осуществить в исходной СТ. Он объединяет понятия пинч-теплообменников и пинча СТ, приведенных в данной главе, с методами математического моделирования. На этапе оптимизации разработанный вариант структуры СТ оптимизируется с помощью математических методов, после чего получается оптимальный конечный вариант реконструкции СТ.

Данный комплексный алгоритм использует четыре математические модели: три линейные математические модели на этапе диагностики и одну нелинейную модель на этапе оптимизации. Линейные модели нужны для последовательного определения отдельных структурных изменений в СТ с наибольшей степенью рекуперации тепла, а нелинейная модель используется для оптимизации затрат компромисса «капитальные затраты – теплота» для выбранного варианта реконструкции СТ.

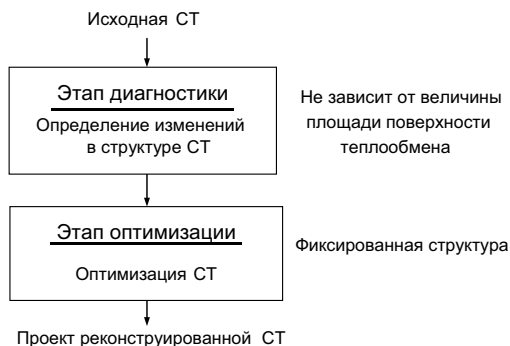


Рис. 7.12. Блок-схема комплексного алгоритма оптимальной реконструкции СТ

Этап диагностики и структурных изменений

Этап диагностики и структурных изменений является основным этапом комплексного алгоритма, поскольку именно на этом этапе определяется базовый вариант реконструкции СТ. На данном этапе одно за другим последовательно определяются структурные изменения СТ, с тем, чтобы дать возможность проектировщику контролировать процедуру проектирования. Постоянный контроль со стороны проектировщика является совершенно необходимым условием успешной разработки промышленно реализуемых вариантов реконструкции СТ.

В отличие от одновременного выбора всех структурных изменений, данная последовательная процедура дает возможность разработать набор квази-оптимальных вариантов структуры СТ. Таким образом, последовательная процедура определения структурных изменений позволяет учитывать практические ограничения, неизбежно существующие при проектировании.

Структурные изменения, которые рассматриваются на этом этапе: изменение месторасположения теплообменников в технологической схеме, добавление новых теплообменников и разделение массовых расходов (энтальпий) потоков. Математические методы используются для определения и выбора месторасположения теплообменников и добавления новых теплообменников, а эвристическое правило разделения потоков – для выбора разделяемых потоков.

Порядок анализа структурных изменений должен быть задан проектировщиком, пример такого порядка приведен на рис. 7.13. Вначале задаются ограничения в структуре существующей СТ, с помощью линейной модели Р1 определяется максимальный предел рекуперации тепла $R_{\max}$. Определяют пинч-пары потоков и пинч СТ для существующей структуры СТ.

Далее рассматривается возможность разделения потоков, путем применения соответствующего эвристического правила, и, если условие выполняется, осуществляют разделение потоков.

7.3 Комплексный алгоритм оптимальной реконструкции теплообменной системы с использованием действующих теплообменников

Если разделение потоков оказывается не подходящим вариантом, то определяется возможность изменения месторасположения теплообменников с наибольшим значением $R_{\max}$, с помощью линейной модели P2. Если вариант изменения месторасположения теплообменников оказывается приемлемым, то алгоритм начинает генерировать другие подобные варианты, до тех пор пока их набор не окажется исчерпанным.

После каждого генерирования приемлемого варианта изменения месторасположения теплообменников вновь осуществляется проверка по эвристическому правилу разделения потоков.

Далее, с помощью линейной модели P3 определяется возможность добавления новых теплообменников в СТ, что могло бы увеличить $R_{\max}$. Поиск продолжается до тех пор, пока набор таких вариантов не оказывается исчерпанным.

После каждого приемлемого варианта добавления нового теплообменника в СТ вновь осуществляется проверка по эвристическому правилу разделения потоков.

Каждое выбранное при помощи математических моделей изменение структуры СТ, имеет новое значение степени рекуперации тепла $R_{\max}$, большее или равное предыдущему $R_{\max}$. Каждый шаг поиска структурных изменений определяется в соответствии с правилами пинча СТ, которые позволяют устранить пинч СТ. Если рассматривать эту проблему с математической точки зрения, то на основе местоположения пинча СТ на составных тепловых кривых каждый раз динамически генерируется гиперструктура СТ. Это значительно уменьшает размерность задачи проектирования и увеличивает скорость её решения.

Этап оптимизации

Главная задача этапа оптимизации – оптимизировать сгенерированную структуру СТ, определенную на этапе диагностики. На этапе оптимизации также рассчитывается структура взаимосвязей и расходы разделенных потоков. На этом этапе не происходит ни добавления, ни удаления, ни изменения местоположения теплообменников, следовательно, структура СТ, определенная на этапе диагностики, остается неизменной.

Таким образом, на этапе оптимизации оптимизируют величину степени рекуперации тепла и площадь поверхности теплообмена в реконструируемой СТ. При этом в качестве оптимизируемой целевой функции используют стоимостные показатели. Методы математического программирования особенно подходят для решения подобных задач оптимизации. В случае, если нужно оценить несколько альтернативных проектных вариантов, каждый вариант оптимизируется отдельно.

Необходимо отметить, что данный комплексный алгоритм не требует задания целевых значений, хотя их можно использовать для оценки проектов. Но в целом, этот комплексный алгоритм не зависит от целевых значений, используемых при проектировании новых СТ.

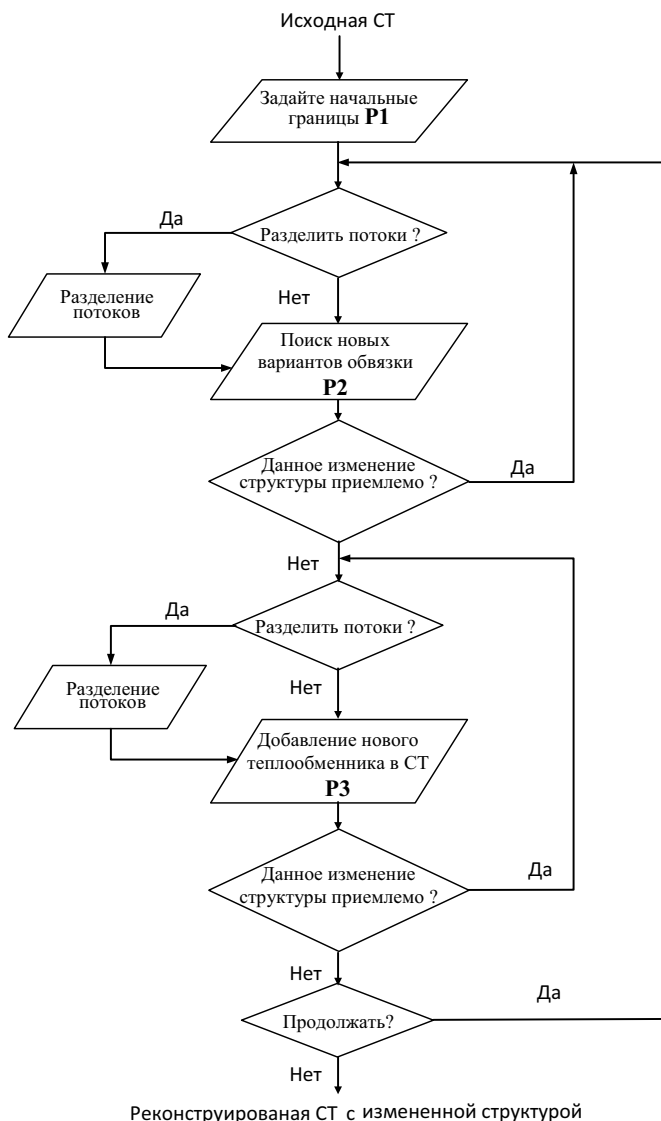


Рис. 7.13 Блок-схема алгоритма этапа диагностики и структурных изменений оптимальной реконструкции теплообменных систем

ГЛАВА VIII

ПИНЧ-МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

8.1 Расширенный пинч-метод для проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов

Производственный комплекс включает в себя несколько отдельных технологических систем, других производственных систем, а также различные системы энергоснабжения. В основе методологии проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов лежит расширенная концепция пинч-метода. Эта методология предусматривает проектирование каждой технологической системы и системы энергоснабжения комплекса таким образом, чтобы в рамках всего комплекса потребление различных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), в том числе тепла и механической энергии было оптимальным. На рис. 8.1 представлена типовая схема производственного комплекса.

Некоторым технологическим системам требуются локальные системы энергоресурсов, другие используют общую центральную систему энергоснабжения комплекса, которая в одних случаях может быть размещена на данном предприятии, а в других случаях система энергоснабжения может быть внешней по отношению к комплексу, или предприятию.

Системы энергоснабжения используют либо местное топливо, либо топливо, импортированное из-за пределов производственного комплекса, а также импортированную либо произведенную совместно с теплотой механическую энергию. Обычно технологические системы проектируются и управляются как самостоятельные системы инженерами одних подразделений компании или внешними подрядчиками, в то время как центральные энергетические службы разрабатываются и управляются инженерами других подразделений или другими подрядчиками. Инфраструктура предприятия развивается без учета совокупных потребностей. Несколько отдельных технологических систем могут располагаться на различных участках предприятия и управляться как самостоятельные подразделения.

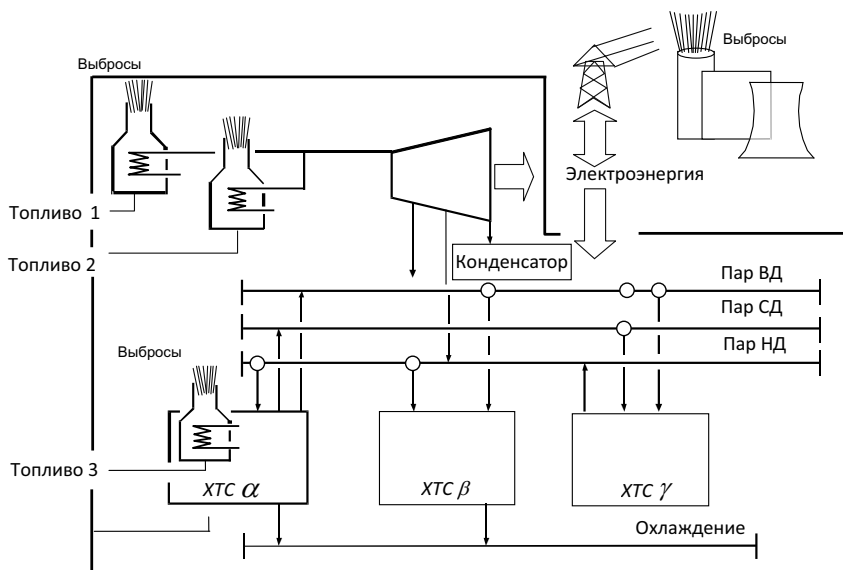


Рис. 8.1. Схема химического производственного комплекса

Такое положение дел приводит к неоправданным расходам энергоресурсов. Чтобы улучшить эффективность энергопотребления предприятия необходимо применить такой подход к проектированию и модификации технологических схем, а также к планированию потребления энергоресурсов, чтобы можно было использовать общую целевую функцию при производстве продукции с минимальным использованием энергии и капитальных затрат.

Энергетическая кривая производственного комплекса

Эффективность использования горячих и холодных энергоресурсов в технологической системе можно проанализировать с помощью графиков больших составных кривых. График большой составной кривой показывает эффективность использования различных энергоисточников (утилит). С помощью графика большой составной кривой, можно разработать оптимальный вариант проекта как технологической системы, так и системы энергоснабжения.

На рис. 8.2 представлены большие составные кривые для трех технологических систем. Большая составная кривая каждой технологической системы указывает, каким количеством тепла обладает каждый температурный

8.1 Расширенный пинч-метод для проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов

интервал после того, как были осуществлены все возможные тепловые объединения потоков внутри данной технологической системы.

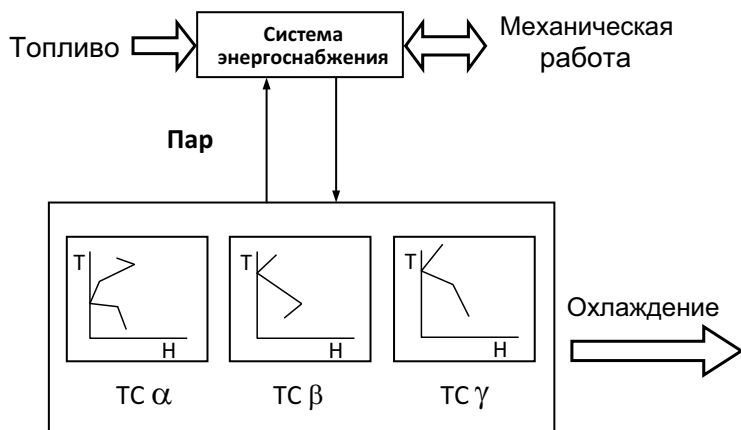


Рис. 8.2. Тепловые потоки трех технологических систем (ТС α, ТС β, ТС γ), представленные в виде больших составных кривых

Кривая над пинч-точкой отображает потребителя тепла, а кривая ниже точки пинча – источник тепла.

Далее строят тепловую кривую источников тепла производственного комплекса путем объединения всех источников тепла всех технологических систем данного производственного комплекса, аналогично тому, как строят горячую составную кривую для отдельной технологической системы (рис. 8.3). Наличие на графиках больших составных кривых «карманов рекуперации тепла» позволяет проектировщику либо включать составляющие их тепловые потоки в энергетическую кривую производственного комплекса, и таким образом увеличивать число степеней свободы при проектировании, либо не включать эти тепловые потоки в энергетическую кривую, уменьшая степень свободы при проектировании.

Аналогично, строят тепловую кривую потребителей тепла производственного комплекса, которая получается путем объединения всех потребителей тепла всех технологических систем данного производственного комплекса, подобно холодной составной кривой отдельной технологической системы. В совокупности кривые производственного комплекса дают полную и одновременную картину избытка и дефицита тепла для всех технологических систем производственного комплекса.

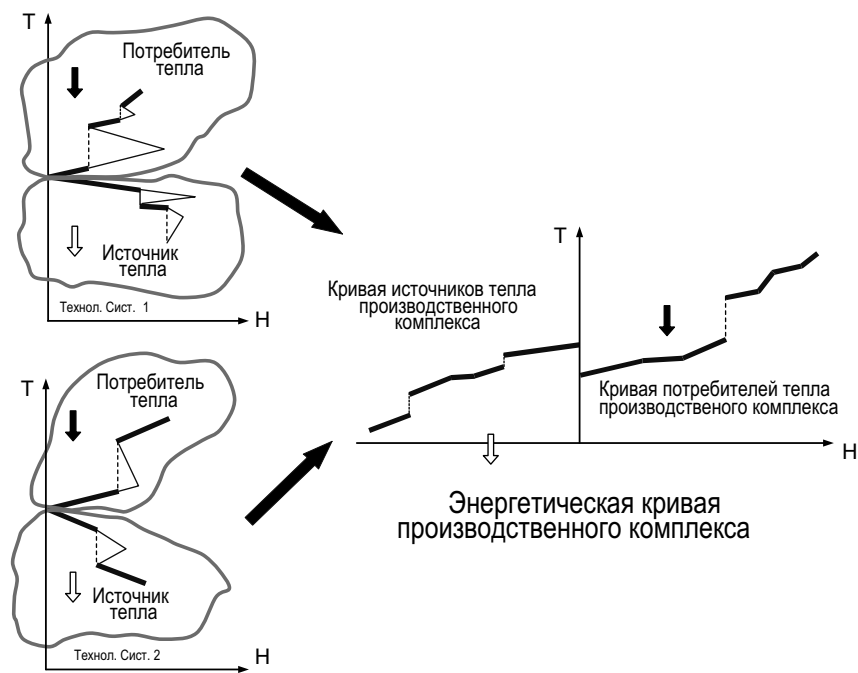


Рис. 8.3. Построение энергетической кривой производственного комплекса, состоящего из двух технологических систем

На рис. 8.4 показано расположение энергоносителей (магистралей пара) на графике энергетической кривой комплекса. С помощью графика в координатах «коэффициент цикла Карно η_c – энтальпия» можно избежать громоздкой процедуры моделирования, поскольку по этому графику можно определить целевые значения показателей совместного генерирования тепла и механической работы, а также потребления топлива.

Приведенная ниже энергетическая кривая производственного комплекса дает проектировщику ценную информацию о генерировании пара среднего давления (СД) всеми технологическими системами, как это показано на рис. 8.4 – уровень D. На этом рисунке генерируемый пар СД удовлетворяет потребность в нагревании для некоторых технологических систем (D). Остаточную потребность в паре СД (C) удовлетворяет система турбин. Потребность в паре высокого давления (ВД), как видно по целевому значению из графика энергетических кривых производственного комплекса, равна (B). Чтобы удовлетворить потребности в паре ВД (B) и оставшуюся часть потребности в паре СД (C), необходимо, чтобы центральная котельная комплекса производила (A) единиц пара очень высокого давления (ОВД).

8.1 Расширенный пинч-метод для проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов

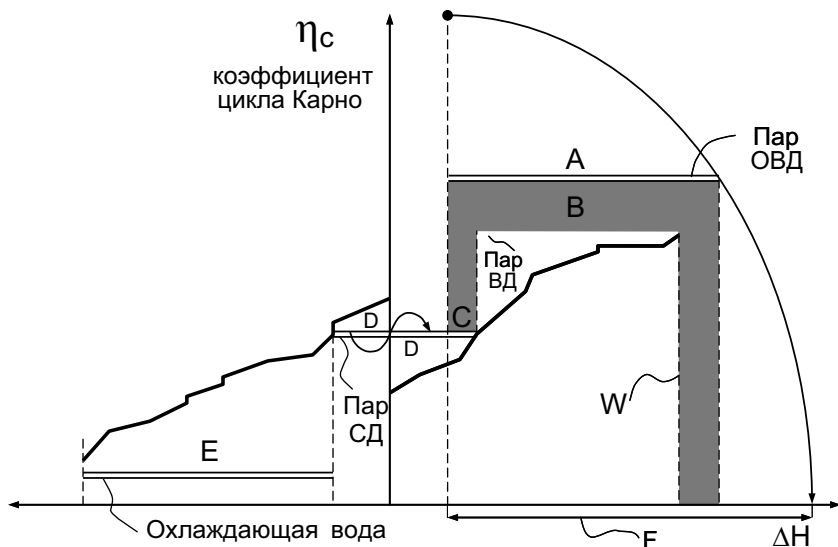


Рис. 8.4. Расположение энергоносителей в производственном комплексе

Дополнительное количество пара ОВД потребуется для удовлетворения потребности совместного производства тепла и механической энергии.

Потребность в топливе (F) рассчитывается, исходя из графика в координатах «расход топлива – энтальпия». Потребности в охлаждающем энергоисточнике для всего производственного комплекса (E) можно также найти из энергетической кривой производственного комплекса. В данном случае охлаждение осуществляется с помощью источника охлаждающей воды CW .

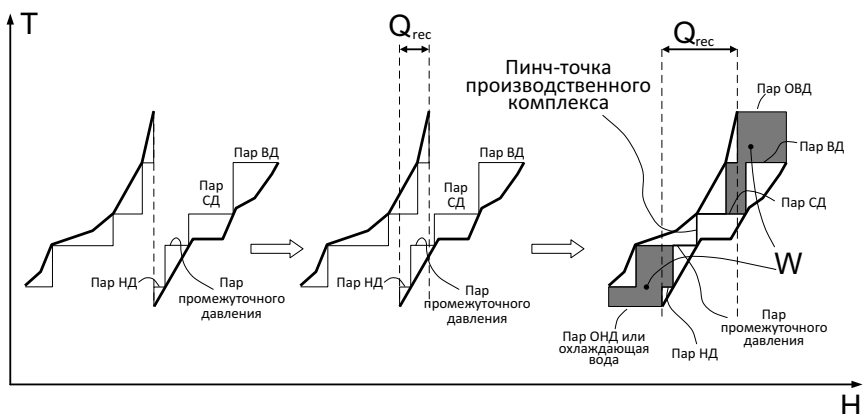


Рис. 8.5. Построение составных кривых производственного комплекса и определение пинч-точки производственного комплекса

Количество теплоты, которое можно рекуперировать внутри комплекса, направив её в паровые магистрали, рассчитывается из анализа энергетической кривой производственного комплекса (рис. 8.3 и 8.4). Когда смещают кривую потребителей тепла и кривую источников тепла, образуется область перекрывания, отображающую количество рекуперлируемой теплоты $Q_{\text{рес}}$, которую можно направить в паровые магистрали. Рекуперация тепла достигает предела, когда график потребителей тепла касается графика источников тепла (рис. 8.5).

Положение пинч-точки на составных энергетических кривых комплекса показывает, что рекуперация тепла в данном комплексе достигла максимума. Остающуюся потребность комплекса в тепле удовлетворяют подачей пара ОВД из центральной котельной.

Ниже пинч-точки избыток тепла устраняется охлаждающей водой СW или производством пара низкого давления (НД) или конденсирующей охлаждающей водой СW. Темная область на рис. 8.4 (W), ограниченная графиками потоков пара, пропорциональна потенциальному совместному производству тепла и механической энергии, возможному для данной системы энергоресурсов предприятия. Уровни пара отмечены как пар ОВД, ВД, пар СД, промежуточный пар, пар НД.

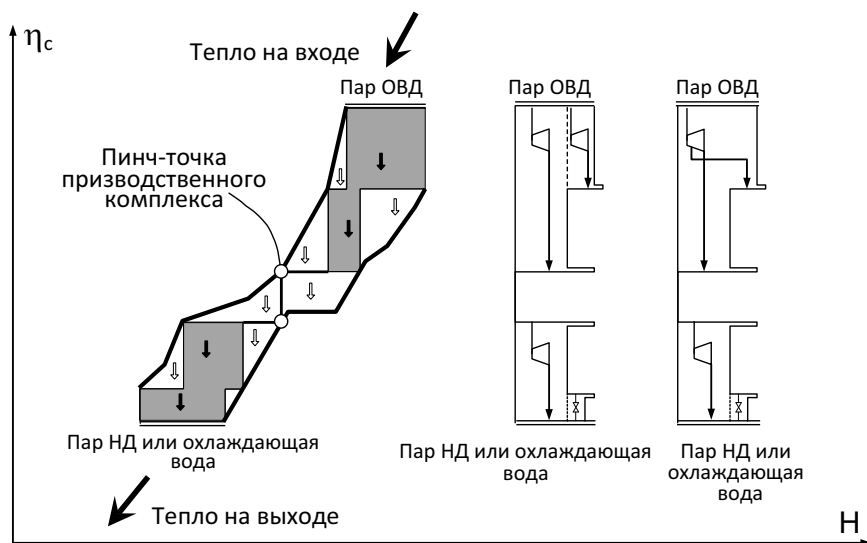


Рис. 8.6. Составные кривые производственного комплекса и большие составные кривые энергоресурсов производственного комплекса

8.1 Расширенный пинч-метод для проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов

Построение и анализ энергетической кривой производственного комплекса представляют собой уникальный аналитический инструмент, который можно использовать для получения целевых значений потребности в топливе, рассчитанных по данным о выработке пара ОВД центральной котельной, рекуперации тепла и возможной совместной выработке тепла и механической энергии внутри комплекса.

Большая составная кривая энергоресурсов производственного комплекса

Большая составная кривая энергоресурсов производственного комплекса является еще одним видом составных энергетических кривых производственного комплекса (рис. 8.6), которая дает проектировщику инструмент для определения возможности совместного генерирования тепла и механической энергии. На стадии получения целевых значений проектировщику остается только проанализировать варианты как для системы энергоснабжения, так и для технологических систем, которые являются наиболее перспективными по энергосбережению. Все варианты рассматриваются с точки зрения расхода топлива и механической энергии.

Сбалансировав потребности в энергии, имеющейся внутри комплекса, и энергии, импортированной извне, можно задать целевые значения глобальных газовых выбросов. На рис. 8.7 показана блок-схема процедуры целевых значений для производственного комплекса. Необходимо принять экономические решения и проанализировать компромиссы при внесении изменений в ХТС, инфраструктуру комплекса, потребности в расходах топлива и пара. Эти решения необходимо проанализировать с глобальных позиций и данная процедура повторяется для того, чтобы выявить набор сценариев, которые отвечали бы различным критериям. В случае, если целевые значения отвечают заданным условиям и ограничениям, проектировщик может с уверенностью разрабатывать стратегию развития производственного комплекса, которая учитывала бы эффект от долго- и краткосрочных инвестиций.

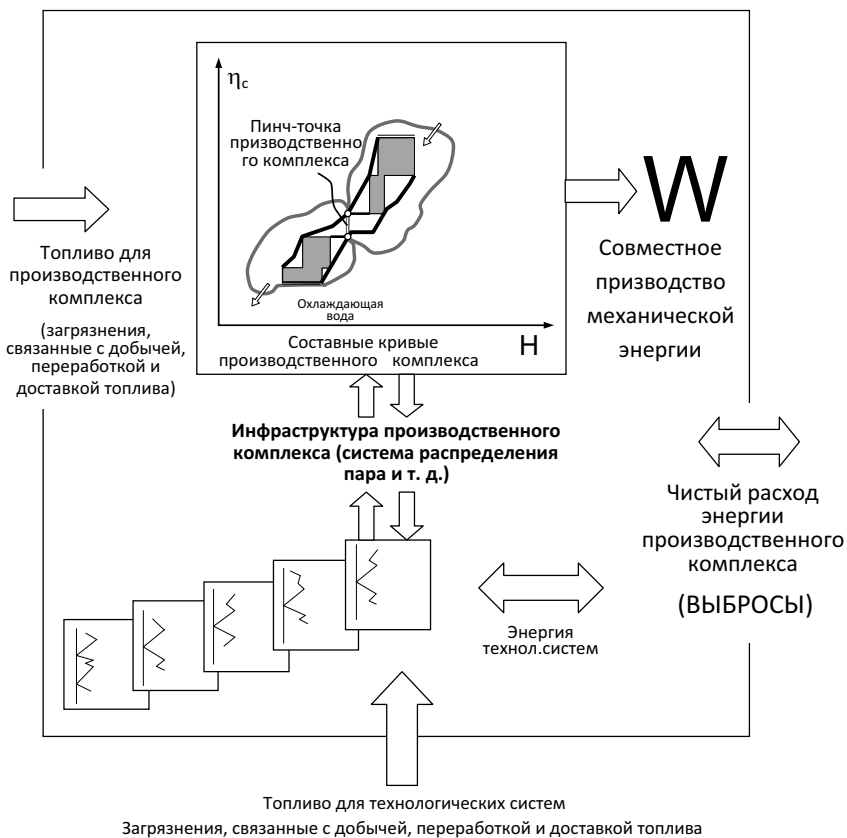


Рис. 8.7. Блок-схема процедуры определения целевых значений для производственного комплекса

8.2 Пример проектирования оптимального энергосберегающего комплекса первичной нефтепереработки

Рассмотрим применение модифицированного пинч-метода проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов на примере проектирования энергосберегающего комплекса первичной нефтепереработки. Исходный нефтеперерабатывающий производственный комплекс состоит из шести технологических систем нефтепереработки и системы энергоснабжения (рис. 8.8). Общее потребление топлива составляет 282 единицы, пара 213 единиц, количество вырабатываемой механической энергии 23 единицы.

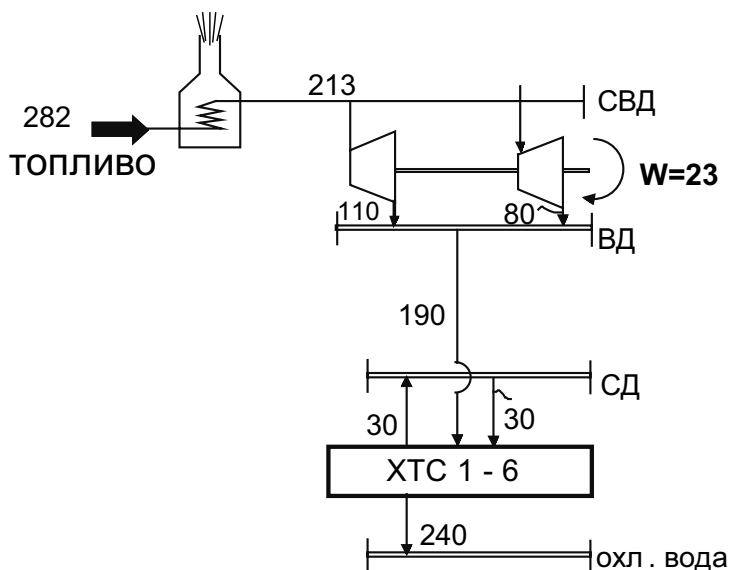


Рис. 8.8. Схема исходного производственного комплекса
первичной нефтепереработки

Требуется разместить новую технологическую систему первичной нефтепереработки в структуре данного производственного комплекса. Новая система, или установка, работает в нормальном температурном интервале. Ей требуется 70 ед. пара СД. Для охлаждения требуется 40 ед. охлаждающей воды. Если исходить только из потребностей новой установки, то для того, чтобы она могла функционировать в рамках данного производственного комплекса, необходимо расширить систему охлаждения и производства пара СД. Дополнительный пар может генерироваться новой турбиной, сни-

жающей давление от ОВД до СД. Также потребуется увеличить выработку пара ОВД, установив параллельный котел (рис. 8.9). Как видно из рис. 8.9, потребуются существенные дополнительные капитальные затраты на осуществление такой модернизации системы энергоснабжения предприятия.

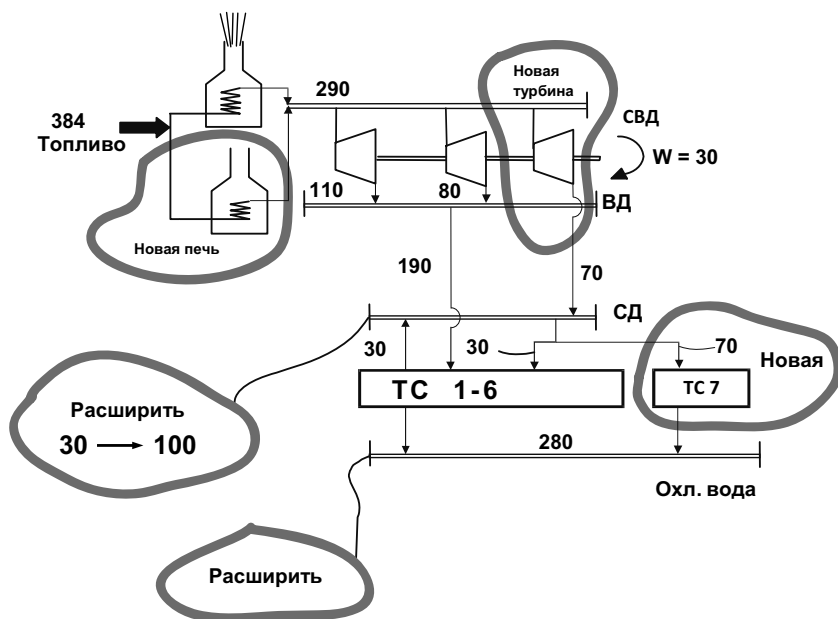


Рис. 8.9 Вариант модернизации нефтеперерабатывающего производственного комплекса с учетом только потребностей новой установки нефтепереработки

Проанализируем как потребности энергии, так и энергетические возможности производственного комплекса. Построим энергетическую кривую производственного комплекса (рис. 8.10). Из графика видно, что существуют неиспользованные возможности действующей системы энергоснабжения.

Вариант модификации системы энергоснабжения производственного комплекса, предложенный на основе анализа энергетической кривой производственного комплекса, оказывается наиболее привлекательным (рис. 8.11).

С помощью энергетической кривой производственного комплекса можно определить при каком давлении пар СД, вырабатываемый самой установкой, удовлетворяет потребности в паре СД, потребляемом этой техно-

8.2 Пример проектирования оптимального энергосберегающего комплекса первичной нефтепереработки

логической системой. Остальные параметры системы, например давление и расходы, меняются соответственно. В итоге, оказывается возможным объединить новую установку первичной переработки нефти с действующей системой энергоснабжения предприятия без необходимости устанавливать новый котел или новую турбину (рис. 8.12).



Рис. 8.10. График энергетической кривой нефтеперерабатывающего производственного комплекса

В таблице 8.1 сравниваются альтернативные варианты энергоснабжения, для которых с помощью энергетических кривых комплекса определены целевые значения. Альтернативный вариант системы энергоснабжения производственного комплекса дает 15–20%-ное улучшение показателей эффективности (как по величине текущих затрат, так и по снижению выбросов CO₂), и при этом для данного варианта требуются также меньшие капитальные затраты.

Таблица 8.1

Сравнительная характеристика двух вариантов изменения систем энергоснабжения производственного комплекса

Характеристики систем энергоснабжения комплекса	Вариант 1 (Без анализа энергетических кривых комплекса)	Вариант 2 (С анализом энергетических кривых комплекса)
Выбросы CO ₂	100 %	86 %
Эксплуатационные затраты	100 %	81 %
Влияние на капитальные затраты	• Увеличить производство пара СД • Новая турбина • Новый котел • Расширить систему охлаждения	• Изменить давление пара СД и увеличить производство пара СД • Адаптировать другие элементы технологической системы

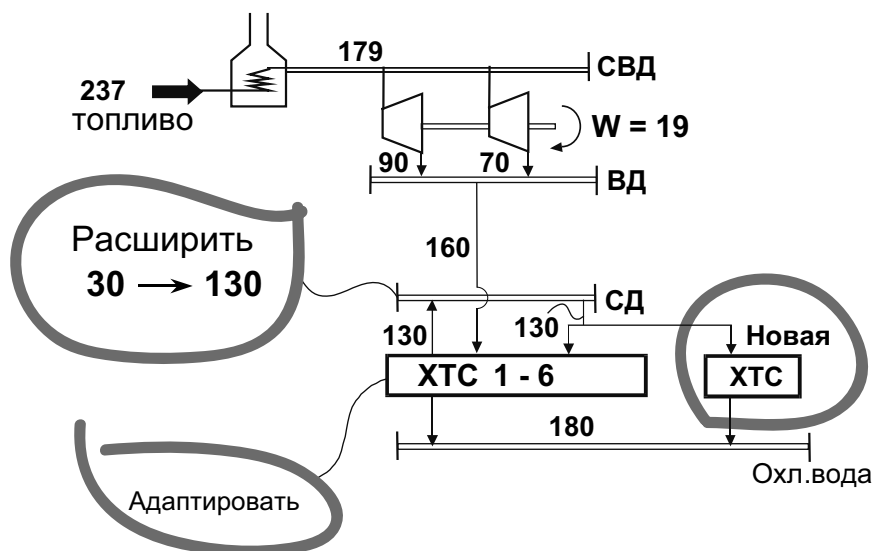


Рис. 8.11. Альтернативный вариант энергетической модернизации нефтеперерабатывающего комплекса с учетом как потребностей энергии новой установки нефтепереработки, так и энергетических возможностей самого комплекса

8.2 Пример проектирования оптимального энергосберегающего комплекса первичной нефтепереработки



Рис. 8.12. Энергетическая кривая нефтеперерабатывающего производственного комплекса для альтернативного варианта модернизации систем энергоснабжения комплекса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге рассмотрены базовые понятия и методы технологии интеграции тепловых процессов, называемой также пинч-технологией. Необходимо вновь подчеркнуть, что эта технология не ограничена в применении лишь интеграцией тепла и энергии, но применяется также для интеграции водных систем, массообменных систем, водородных систем и т.д., однако в данной работе мы рассматриваем только интеграцию тепла и энергии.

Отметим еще раз ключевые моменты в пинч-технологии.

Горячие и холодные потоки не подразумевают, что температуры одних потоков выше температур других потоков. В теории интеграции процессов, «горячим» считается поток, который требуется охладить, а «холодным» поток, который нужно нагреть безотносительно того, какие у них температуры.

Составные кривые образуются путем комбинирования индивидуальных горячих или холодных потоков на энтальпийной диаграмме в системе координат Н-Т.

Объединяя горячую и холодную составные кривые на одном графике, мы сводим всю задачу к анализу энтальпий «одного составного горячего потока» и «одного составного холодного потока» системы.

Минимальная разность температур между составными кривыми является «пинчем» системы. Он однозначно задает потребность

CONCLUSION

The brochure describes key items and methods of heat and energy process integration which is often referred to as Pinch Technology. It is worth to stress again, that this technology is not limited in its application to heat and energy, but can be used for integration of water, mass, hydrogen, etc system. However in this work we consider only heat and energy integration.

We would like to point out key aspects of Pinch Technology.

Hot and cold streams do not mean that temperatures of some stream are higher than temperatures of the other streams. In process integration, the “hot” stream is the one which needs to be cooled down, and the “cold” stream is the one which needs to be heated up irrespective to the temperatures they have.

Composite curves are made by combining individual hot or cold streams on the T-H enthalpy diagram.

By combining hot and cold composite curves on one graph we reduce the task to analysis of “one composite hot stream” and “one composite cold stream”.

The minimum temperature difference between the composite curves is the pinch. It defines the process requirement in hot and cold utilities. Knowing those targets, we can say whether the current process is optimal in terms of energy consumption.

технологической системы в горячей и холодной утилитах (внешних энергоносители и энергопотребители). Зная эти целевые значения, можно с уверенностью определить, является ли нынешний вариант системы оптимальным.

В пинч-технологии существует ряд правил, которые позволяют анализировать, проектировать и реконструировать систему теплообменников, добываясь целевых (минимальных) значений потребности во внешних горячих и холодных утилитах, а значит и минимальной стоимости топлива и минимальных выбросов:

- НЕ ПЕРЕДАВАТЬ ТЕПЛО ЧЕРЕЗ ПИНЧ-ТОЧКУ
- Не использовать горячую утилиту под пинчем
- Не рекуперировать тепло технологической системы через пинч
- Не использовать холодную утилиту над пинчем

Для автоматизации расчетов, вместо графиков составных кривых целесообразно использовать табличный алгоритм.

Предпочтительнее использовать сеточные диаграммы для отображения систем теплообменников.

Рассмотренный метод проектирования позволяет синтезировать теплообменные системы с максимальной рекуперацией тепла, соответствующей целевым значениям составных кривых на энтальпийной диаграмме.

Можно проводить оптимизацию структуры системы теплообменников

There are sets of rules in Pinch Technology which enable the engineer to analyse, design and retrofit heat exchanger network, to achieve the target hot and cold utility requirements, hence the minimum costs of fuel and minimum emissions:

- DO NOT TRANSFER HEAT THROUGH THE PINCH
- Do not use hot utility below the pinch
- Do not recover process heat over the pinch
- Do not use cold utility above the pinch

For calculations purposes, it is more convenient to use Table Algorithm instead of Composite Curves.

The described Maximum Energy Recovery design method enables to design heat exchanger networks with the energy requirements equal to target values.

It is possible to optimise the heat exchanger network structure before the complex design. This possibility of preliminary assessment of the targets for the process which has not yet been designed is one of the strongest aspects of pinch method.

Grand composite curves are another representation of energy consumption and conversion in T-H diagram. Grand composite curve is the graph of the residual requirement in heating or cooling for the process. Grand composite curve is the main tool to determine the utility levels and also heat engines and other energy sinks and sources (distillation columns, heat pumps, etc)

ещё до начала поэтапного решения сложной задачи проектирования. Эта возможность предварительной оценки значения целевой функции для ещё не сгенерированной технологической схемы проектируемой ТС является сильнейшей стороной пинч-метода.

Большие составные кривые – это еще один способ представить процессы потребления и преобразования энергии в технологической системе на диаграмме «температура – энтальпия». Большая составная кривая – это кривая остаточной потребности в нагревании или охлаждении для технологической системы. Большая составная кривая – это основной инструмент для определения мест введения в технологическую систему энергоносителей, а также процессов и аппаратов – внутренних энергопотребителей (ректификационных колонн, тепловых насосов и т. д.)

Существующие правила помогают правильно разместить тепловые машины в системе. Разработаны методы на основе пинч-анализа, позволяющие не только проектировать новые системы теплообменников, но и реконструировать существующие.

Пинч-метод позволяет также анализировать, проектировать и реконструировать системы энергоснабжения/энергопотребления производственных комплексов. Инструментами для анализа таких систем являются энергетическая кривая производственного комплекса, составные кривые производственного комплекса и большие составные кривые энергоресурсов производственного комплекса.

Existing rules help the designer to properly place heat engines in the system.

Pinch technology not only provides heat exchanger network design methods but also network retrofit methods.

Pinch technology also provides the tools for analysis, design and retrofit of total site utility systems. The tools include total site profiles, total site composite curves, total site grand composite curves.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список рекомендуемой литературы

1. Дови В., Пуйджанер Л., Смит Р., Мешалкин В. Основы экономики ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем и окружающей среды (Fundamentals of Process Integration and Environmental Economics), DICHER, Università degli Studi di Genova, Italy, 1999, 444 с.
2. Дови В., Пуйджанер Л., Смит Р., Мешалкин В. Передовые концепции экономики ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем и охраны окружающей среды (Advanced concepts of process Integration and Environmental Economics), DICHER, Università degli Studi di Genova, Italy, 2000, 691 с.
3. Клемеш Й., Костенко Ю., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л., Капустенко П., Ульев Л., Перевертайленко А., Зулин Б. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки. Теоретические основы химической технологии, 1999, т. 33, № 4, с. 420–431.
4. Мешалкин В., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л., Капустенко П. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем, Харьков, НТУ «ХПИ», 2006.
5. Мешалкин В., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л., Капустенко П. Основы энерго-ресурсоэффективных экологически безопасных технологий нефтепереработки. Харьков, НТУ «ХПИ», 2006, 616 с.
6. Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., Капустенко П. А., Ульев Л. М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков, НТУ «ХПИ», 2000, 458 с.
7. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л., Капустенко П., Ульев Л., Болдырев С. Улучшение тепловой интеграции на сахарных заводах. Интегровани технології та енергозбереження, 2002, № 2, с. 11–16.

8. Ahmad S., Smith R. Targets and design for minimum number of shells in heat exchanger networks. Chemical Engineering Research and Design, 1989. 67 (5), pp. 481–494.
9. Al-Riyami B.A., Klemeš J., Perry S. Heat integration retrofit analysis of a heat exchanger network of a fluid catalytic cracking plant. Applied Thermal Engineering, 21, pp. 1449–1487, 2001.

10. Asante N.D.K., Zhu X.X. An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit. *Chemical Engineering Research and Design*, 75 (part A), pp. 349–360, 1997.
11. Desai N.B., Bandyopadhyay S. Process integration of organic Rankine cycle. *Energy*, 34 (10), pp. 1674–1686, 2010.
12. Dhole V.R., Linnhoff B. Distillation column targets. *Computers & Chemical Engineering*, 17 (5/6), pp. 549–560, 1993.
13. Dhole V.R., Linnhoff B. Total site targets for fuel, co-generation, emissions and cooling. *Computers & Chemical Engineering*, 17 (Suppl.), pp. 101–109, 1993.
14. Donnelly N., Klemeš J., Perry S. Impact of economic criteria and cost uncertainty on HEN network design and retrofit. In J. Klemeš (Ed.), *Proceedings of PRES '05*, pp. 127–132. Milano, Italy: AIDIC, 2005.
15. El-Halwagi M.M. *Process integration*. Amsterdam: Academic Press, 2006.
16. Friedler F. *Process Integration, Modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction*. Applied Thermal Engineering. 2010.
17. Georgiadis M.C., Pistikopoulos E.N. *Energy and process integration*. Redding, CT: Begell House. 2006.
18. HEAT-int. PIL Web Pages. <www.processint.com/chemical-industrial-software/heat-int> 2012 (accessed 23 July 2012)..
19. Herrera A., Islas J., Arriola A. Pinch technology application in a hospital. *Applied Thermal Engineering*, 23, pp. 127–139, 2003.
20. Kemp I.C. *Pinch analysis and process integration. A user guide on process integration for efficient use of energy*. Amsterdam: Elsevier, 2007.
21. Kim J., Smith R. Pinch design and analysis. In *Encyclopedia of Chemical Processing*, pp. 2165–2180. New York: Marcel Dekker, 2005.
22. Klemeš J., Bulatov I., Perry S. Energy efficiency and carbon footprint reduction. In E. Pistikopoulos, M. Georgiadis and E. S. Kikkinides (Eds.), *Process systems engineering*, vol. 5, pp. 203–254. Weinheim, Germany: Wiley, 2008.
23. Klemeš J., Dhole V.R., Raissi K., Perry S.J., Puigjaner L. Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO₂ on total sites. *Applied Thermal Engineering*, 7, pp. 993–1003, 1997.
24. Klemeš J., Friedler F., Bulatov I., Varbanov P. *Sustainability in the Process Industry. Integration and Optimisation*. McGrawHill, 2011.
25. Klemeš J., Perry S. Process optimisation to minimise energy use in food processing. In K. Waldron (Ed.), *Handbook of waste management and co-product recovery in food processing*, vol. 1, pp. 59–89. Cambridge, U.K.: Woodhead, 2007.
26. Klemeš J., Smith R., Kim J.-K. (Eds.). *Handbook of water and energy management in food processing*. Cambridge, U.K.: Woodhead, 2008.

27. Linnhoff B., Ahmad S. Cost optimum heat exchanger networks –1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. *Computers & Chemical Engineering*, 14 (7), pp. 729–750, 1990.
28. Linnhoff B., Dhole V. R. Shaftwork targets for low temperature process design. *Chemical Engineering Science*, 47 (8), pp. 2081–2091, 1992.
29. Linnhoff B., Dhole V. R. Targeting for CO₂ emissions for total sites. *Chemical Engineering and Technology*, 16 (4), pp. 252–259, 1993.
30. Linnhoff B., Flower J. R. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks. *AIChE Journal*, 24 (4), pp. 633–642, 1978.
31. Linnhoff B., Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 38 (5), pp. 745–763, 1983.
32. Linnhoff B., Mason D. R., Wardle I. Understanding Heat Exchanger Networks. *Computers & Chemical Engineering*, 3 (1–4), pp. 295–302, 1979.
33. Linnhoff B., Townsend D. W., Boland D., Hewitt G. F., Thomas B. E. A., Guy A. R., Marsland R. H. A user guide on process integration for the efficient use of energy. Rugby, U. K.: IChemE, 1982 [revised edition published in 1994].
34. Linnhoff B., Vredeveld D. R.. Pinch technology has come of age. *Chemical Engineering Progress*, 80 (7), pp. 33–40, 1984.
35. Nie X. R., Zhu X. X. Heat exchanger network retrofit considering pressure drop and heat-transfer enhancement. *AIChE Journal*, 45 (6), pp. 1239–1254, 1999.
36. Panjeh Shahi M. H., Tahouni N. Pressure drop optimisation in debottlenecking of heat exchanger networks. *Energy*, 33 (6), pp. 942–951, 2008.
37. Polley G., Panjeh Shahi M. H., Jegede F. O. Pressure drop considerations in the retrofit of heat exchanger networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 68 (3), pp. 211–220, 1990.
38. Polley G., Reyes Athie C. M., Gough M. Use of heat transfer enhancement in process integration. *Heat Recovery Systems and CHP*, 12 (3), pp. 191–202, 1992.
39. Raissi K. Total site integration. PhD thesis, UMIST, Manchester, U. K., 1994.
40. Shenoy U. Heat exchanger network synthesis: Process optimization by energy and resource analysis. Houston, TX: Gulf Professional, 1995.
41. Smith R. Chemical process design. New York: McGraw-Hill, 1995.
42. Smith R. Chemical process: design and integration. Chichester, U. K.: Wiley, 2005.
43. Smith R., Linnhoff B. The design of separators in the context of overall processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 66 (3), pp. 195–228, 1988.

44. Townsend D. W., Linnhoff B. Heat and power networks in process design. Part II: Design procedure for equipment selection and process matching. *AIChE Journal*, 29 (5), pp. 748–771, 1983.
45. Townsend D. W., Linnhoff B. Surface area targets for heat exchanger networks. *ICHEME 11 th Annual Research Meeting* (Bath, U.K., April), 1984.
46. Varbanov P., Doyle S., Smith R. Modelling and optimization of utility systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 82 (A5), pp. 561–578, 2004.
47. Varbanov P., Perry S., Klemeš J., Smith R. Synthesis of industrial utility systems: Cost-effective decarbonisation. *Applied Thermal Engineering*, 25 (7), pp. 985–1001, 2005.

ГЛОССАРИЙ

Из книги «Основы интеграции тепловых процессов» (Смит Р., Клемеш Й., Тобажнянский Л. Л., Капустенко П. А., Ульев Л. М. Харьков, НТУ «ХПИ», 2000. ISBN 5-7763-2107-7) с любезного согласия авторов.

Балансные составные кривые (Balanced Composite Curves): составные кривые, изображенные с учетом изменения энтальпии и температуры, используемых утилит.

Балансная сеточная диаграмма (Balanced Grid Diagram): сеточная диаграмма системы потоков и утилит.

Большая составная кривая БСК (Grand Composite Curves): температурно-энтальпийная диаграмма, показывающая суммарное изменение энтальпии системы холодных и горячих потоков в каждом из температурных интервалов.

Большие утилитные составные кривые производственного комплекса (Site Utility Grand Composite Curves): строятся при помощи составных кривых производственного комплекса в (η_c, H) координатах подобно БСК.

Горячий поток (Hot Stream): технологический поток, который необходимо охладить.

Извлечение данных (Data Extraction): анализ технологической схемы и определение данных, необходимых для решения задачи рекуперации теплоты (или интеграции в широком смысле).

Каскад (Cascade): последовательность тепловых потоков задачи рекуперации тепловой энергии через сдвинутые границы температурных интервалов, которые расположены в строго убывающем порядке температурных значений.

Луковичная диаграмма (Onion Diagram): диаграмма иерархического строения химико-технологической системы, выполненная в виде концентрических круговых слоев.

Максимальная рекуперация энергии Maximum Energy Recovery (MER): предельно возможное, наибольшее значение величины рекуперированной энергии в теплообменной сети для заданного значения $\Delta T_{\min}$.

Общие температурные профили производственного комплекса (Total Site Profiles): комбинированная большая составная кривая для всех процессов, входящих в комплекс.

Перекрестное соединение (Criss-Cross Match): размещение двух и более теплообменных аппаратов так, что в одном из них теплообмен происходит между горячим потоком, имеющим большую температуру, чем горячий поток в других теплообменниках, а холодный поток имеет более низкую температуру, чем холодный поток в других теплообменниках.

Перекрестный теплообмен (Criss-Cross Heat Transfer): теплообмен между горячими и холодными потоками, который на энтальпийно-температурной диаграмме изображается перекрывающимися линиями. Образуется при перекрестном соединении теплообменников.

Петля (цикл) (Loop): замкнутая система связей в теплообменной сети, проходящая через рекуперативные теплообменные аппараты и технологические потоки.

Пинч (Pinch): область наибольшего сближения горячей и холодной составной кривой на температурно-энтальпийной диаграмме (альтернативно пинч может быть определен как точка, в которой тепловой поток в каскаде равен нулю).

Пинч-метод проектирования (Pinch Design Method): метод проектирования теплообменных сетей, неотъемлемой частью которого является соблюдение принципа $\Delta T_{\min}$ на пинче.

Подсистема (Subsystem): набор потоков и утилит в задаче рекуперации теплоты, которые находятся в общем энтальпийном балансе.

Подходящее размещение (Appropriate Placement): расположение тепловой машины или теплового насоса относительно рекуперативного пинча, при котором наблюдается наилучшая совместная энергетическая производительность.

Пороговая задача (Threshold Problem): задача рекуперации теплоты, в которой присутствует только одна утилита холодная или горячая в области значений $\Delta T_{\min}$, заключенной между нулем и пороговым значением $\Delta T_{\min}$.

Пороговое значение $\Delta T_{\min}$ (Threshold $\Delta T_{\min}$): значение $\Delta T_{\min}$, начиная с которого при увеличении $\Delta T_{\min}$ появляется две утилиты в пороговой задаче.

Правило отметки («Tic-off» Heuristic): отметка технологических потоков на сеточной диаграмме для последующей максимизации тепловой нагрузки теплообменной связи между ними.

Профиль (Profile): температурно-энтальпийный график потока или составной кривой.

Профиль источника (Source Profile): часть большой составной кривой ниже температуры пинча.

Профиль стока (Sink Profile): часть большой составной кривой выше температуры пинча.

Путь (Path): система связей в теплообменной сети, сформированная непрерывным маршрутом между утилитным нагревом и утилитным охлаждением.

Расщепление потоков (Stream-Splitting): деление потока на две или больше параллельных линии, представленных на сеточной диаграмме.

Сеточная диаграмма (Grid Diagram): графическое изображение технологических потоков в виде горизонтальных линий, а рекуперативных теплообменных связей между ними в виде вертикальных линий, соединяющих соответствующие потоки.

Составные кривые производственного комплекса (Site Composite Curves): общие температурные профили комплекса, показанные с перекрытием в координатах (η_c , H).

Составная кривая (Composite Curve): комбинированный температурно-энтальпийный график всех холодных или всех горячих потоков в рассматриваемой ХТС.

Температура снабжения (Supply Temperature): температура, с которой поток входит в рекуперативную задачу.

Температурный интервал (Temperature Unterval): часть задачи рекуперации теплоты между двумя температурами, которая содержит фиксированный набор потоков с постоянными потоковыми теплоемкостями. Граничные значения температуры интервалов определяются либо температурами снабжения, либо целевыми температурами или температурами, на которых происходит изменения потоковой теплоемкости.

Теплообменная сеть (Heat Exchange Network): система рекуперативных и утилитных теплообменников.

Утилита (Utility): внешние источники энергии или хладагенты, используемые для нагрева или охлаждения потоков.

Холодный поток (Cold Stream): поток, который для его дальнейшего использования необходимо охладить.

Цель (Target): проектные ограничения, определенные до начала проектирования.

Целевая температура (Target Temperature): температура, с которой поток покидает задачу рекуперации теплоты.

Цикл (Loop): замкнутая система связей в теплообменной сети, проходящая через рекуперативные теплообменные аппараты и технологические потоки.

Циклическое размещение (Cyclic Matching): повторяющиеся размещения теплообменных связей для различных пар технологических потоков.

Эксергетическая большая составная кривая (Exergy Grand Composite): большая составная кривая, построенная в координатах

Эксергетическая составная кривая (Exergy Composite): составная кривая, построенная в координатах

Энергетическая релаксация (Energy Relaxation): процесс уменьшения рекуперации энергии в теплообменной системе с целью упрощения проекта.

CP правила (CP-Rules): правила, определяющие возможность размещения рекуперативного теплообменника на потоках в зависимости от соотношения их потоковых теплоемкостей (преимущественно вблизи локализации пинча).

CP таблица (CP-Table): представление потоковых теплоемкостей в виде таблицы.



Издательство «СТРАТА» при поддержке «Н-Пром Бюро» представляет серию книг «ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ»

В 2012 году были изданы следующие монографии:

Деменок С. Л.

Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах и каналах

ISBN 978–586983–099–9

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с выводом основных соотношений, определяющих численные значения характеристик гидродинамики и теплообмена в трубах и каналах. Особое внимание уделено вопросам теоретического рассмотрения характеристик потока вблизи ограничивающих его стенок. Приведены представительные данные по исследованию теплообмена и трения при турбулентном течении в трубах и каналах.



Деменок С. Л., Медведев В. В., Сивуха С. М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках

ISBN 978–586983–090–6

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с применением шаровых укладок в теплообменных и технологических устройствах и аппаратах. Особое внимание уделено анализу влияния на гидродинамику и теплообмен геометрических параметров шаровых укладок, как регулярных, так и случайных. На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа данных других авторов предложены зависимости для учета воздействия дополнительных факторов: числа рядов в укладке; ограждающих проницаемых поверхностей; градиента потока и температурного фактора.

Монографии предназначены для специалистов-теплотехников, занимающихся решением теоретических и прикладных задач по тепло- и массообмену

По вопросам приобретения книг можно обращаться в «Н-Пром Бюро» по адресу:
196084, Россия, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Малиновская, дом 8. Тел/факс +7(812)677-93-15.

Также по всем вопросам можно обращаться в издательство «Страта» по адресу:
195112, Россия, Санкт-Петербург, Новочеркасский пр., дом 39, корпус 1, лит. А. Тел/факс +7(812)528-68-71
www.strata.spb.ru E-mail: info@strata.spb.ru

Булатов Игорь Станиславович

ПИНЧ-ТЕХНОЛОГИЯ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Монография

Научный редактор:
д. т. н., проф., действ. член Академии технологических наук РФ
Аджиев Али Юсупович

Верстка:
Мороз Сергей Владимирович

ООО «Страта»
195112, Санкт-Петербург,
Новочеркасский пр., д. 39, корп.1
Тел. /факс: +7 (812) 528-68-71
www.strata.spb.ru
E-mail: info@strata.spb.ru

Подписано в печать 23.08.2012. Формат 60 x 90 / 16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9.
Тираж 1000 экз. Заказ № 118

Типография «Бионт»
199026, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр., 86

В предлагаемой книге читатель может ознакомиться с основными положениями одной из наиболее эффективных на сегодняшний день технологий энергосбережения в перерабатывающих отраслях. С учётом задач по снижению энергопотребления, стоящих перед отечественной экономикой, применение пинч-технологии, и шире – технологии интеграции процессов – проектировщиками и промышленностью, способно значительно понизить энергоёмкость производств. Особая ценность данной технологии в том, что её можно применять не только для создания новых, но и для реконструкции действующих предприятий. Эффективность описываемой технологии подтверждена тысячами успешных проектов по всему миру в течение двух с лишним десятилетий. Поэтому появление книги на русском языке, посвящённой данной теме, можно только приветствовать. Стоит также отметить, что автор книги работает в группе, где зародилась данная технология. Книга будет особенно полезна для всех, кто начинает изучение пинч-технологии: студентам, аспирантам, сотрудникам инженеринговых компаний, инженерам технологам и энергетикам предприятий.

**Доктор технических наук, проф.,
действительный член Академии технологических наук РФ
Аджиев А. Ю.**



ОСНОВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ