

А. Фраас, М. Оцисик

Расчет и конструирование теплообменников

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.3
ББК 31.352
А11

А11 **А. Фраас**
Расчет и конструирование теплообменников / А. Фраас, М. Оцисик – М.: Книга по Требованию, 2024. – 358 с.

ISBN 978-5-458-36151-4

ISBN 978-5-458-36151-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Глава I

ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Множество типов теплообменников применяется в самых различных агрегатах, таких, как паросиловые установки, отопительные системы зданий, системы кондиционирования воздуха, холодильные установки, транспортные силовые установки автомобилей, судов и самолетов.

В этой главе рассматриваются основные типы оборудования, применяемого в перечисленных агрегатах, с целью иллюстрации задач, которым посвящена данная книга.

СХЕМА ДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Большинство теплообменников можно классифицировать, объединяя их в группы в соответствии со схемой движения теплоносителей через теплообменник.

Четыре наиболее часто реализуемые схемы движения теплоносителей показаны на рис. 1.1. В установках с *прямоточным*, или *параллельным* (см. рис. 1.1, а), движением теплоносителей два потока теплоносителей входят с одной и той же стороны теплообменника, проходят через теплообменник в одном направлении и выходят вместе с другой стороны теплообменника; в установках же с *противоточ-*

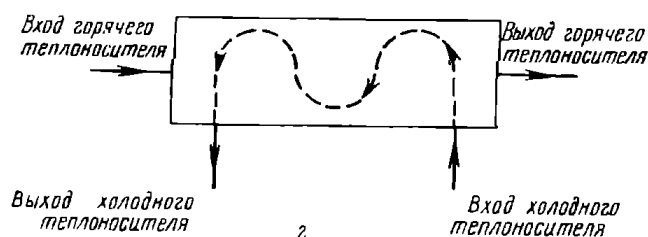
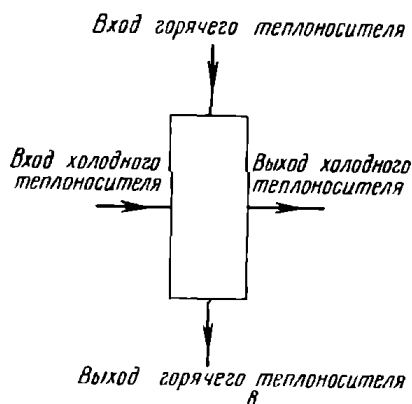
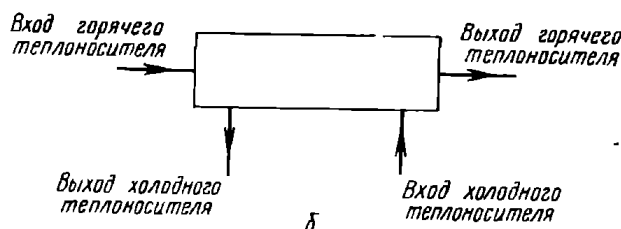
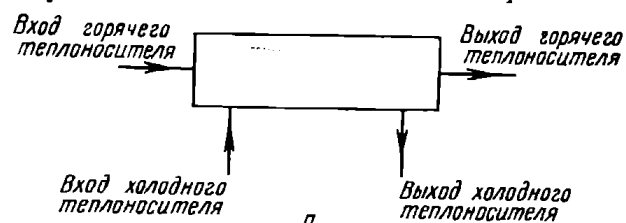


Рис. 1.1. Типичные схемы движения теплоносителей в теплообменниках.

ным, или *встречным* (см. рис. 1.1, б), движением теплоносителей два потока жидкости движутся в противоположных направлениях. В *одноходовых перекрестноточных* (см. рис. 1.1, в) теплообменниках один теплоноситель движется через матрицу теплообменной поверхности под прямым углом по отношению к направлению движения другого теплоносителя. В *многоходовых перекрестноточных* (см. рис. 1.1, г) теплообменниках поток одной жидкости многократно пересекает то в одном, то в противоположном направлении поток другой жидкости, обычно создавая перекрестное приближение к противотoku.

Наиболее существенной отличительной характеристикой каждой из четырех основных схем движения является относительная величина поверхности

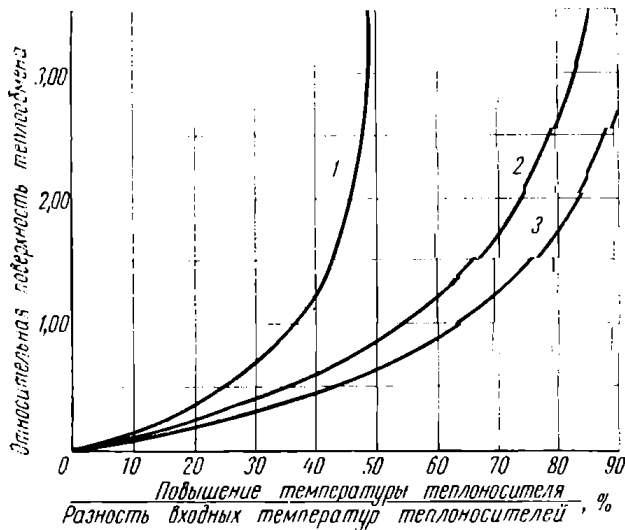


Рис. 1.2. Зависимость необходимой относительной поверхности теплообмена от отношения повышения (или падения) температуры в потоке теплоносителя, претерпевающего большее изменение температуры, к разности температур входящих в теплообменник теплоносителей:

1 — прямоточное движение; 2 — перекрестноточное движение; 3 — противоточное движение.

теплообмена, необходимая для обеспечения данного повышения температуры при данной разности температур двух потоков жидкости, входящих в теплообменник. На рис. 1.2 приведена зависимость относительной поверхности для каждой схемы движения от изменения температуры первичной жидкости для типичной совокупности условий. В области, в которой изменение температуры жидкости по всему теплообменнику составляет небольшой процент разности температур двух поступающих в теплообменник потоков теплоносителей, теплообменники всех типов требуют примерно одинаковой поверхности. Именно в этой области наиболее целесообразно применение прямоточного теплообменника. Теплообменники перекрестноточного типа име-

ют несколько более широкое применение; они особенно подходят для некоторых специальных целей и обладают рядом преимуществ. Теплообменник противоточного типа требует наименьшей поверхности теплообмена во всем возможном диапазоне изменения разности температур входящих в теплообменник жидкостей.

Кроме того, это единственный тип теплообменника, который может быть применим в области, в которой изменения температур в одном или обоих потоках теплоносителей приближаются к разности температур входящих в теплообменник потоков.

Интересно отметить, что природа дает нам замечательный пример одной из высокоэффективных противоточных систем в виде кровеносной системы ног болотных птиц, например цапли. Теплая кровь, движущаяся от сердца к ноге, проходит через системы тонких параллельных кровеносных сосудов, которые чередуются в шахматном порядке с подобными же сосудами, идущими от конечности, образуя один из эффективнейших теплообменников. Эффективность передачи тепла при таком расположении кровеносных сосудов настолько высока, что теплая кровь охлаждается почти до температуры окружающей среды, прежде чем достигнет участка, погруженного в холодную воду; благодаря этому птица теряет сравнительно мало тепла через кожу своей ноги. Конечности некоторых других теплокровных животных, например пингвинов и китов, устроены подобным же образом.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Теплообменники часто классифицируют в соответствии с их назначением; основные типы имеют специальные названия—*паровые котлы, парогенераторы, конденсаторы, излучатели, испарители, градирни, регенераторы, рекуператоры, нагреватели и холодильники*. Особые требования, диктуемые конкретными условиями применения, привели к разработке множества типов

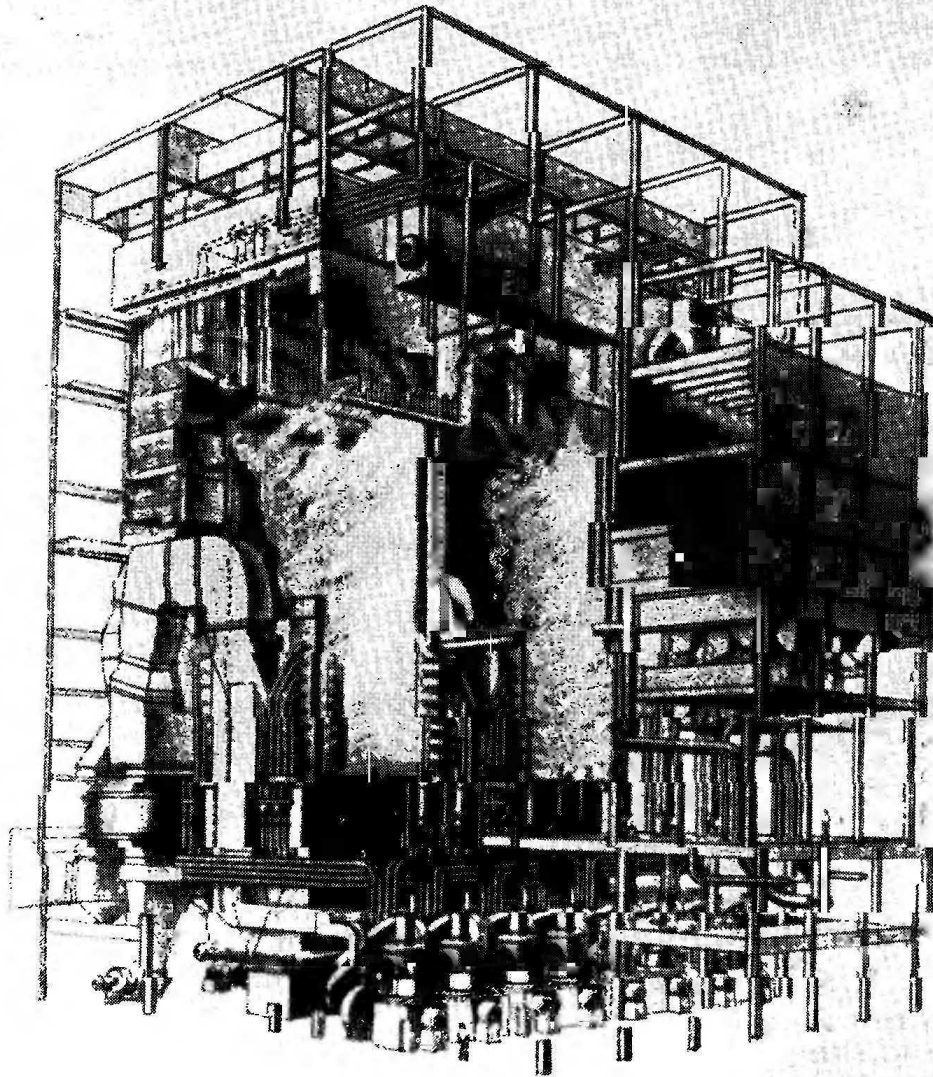


Рис. 1.3. Большой современный паровой котел с пылеугольной топкой (частично показан в разрезе).

конструкций, часть которых уникальна и предназначена для специфических условий. Наиболее распространенные конструкции описаны в последующих главах с целью иллюстрации характеристик и особенностей основных типов теплообменников.

Паровые котлы (бойлеры). Паровые котлы уже более двухсот лет используются для получения пара в паросиловых установках и представляют самый ранний объект применения инженерных принципов расчета теплообменных аппаратов. Существует огромное разнообразие котлов от многих небольших сравнительно простых агрегатов до гигантских сложных и дорогих котлов

на современных электростанциях, где котлы объединены в одно целое с топкой, так что тепловые потери через стенки из топки минимальны. На стенках топки располагают ряды труб, которые окружают зону горения, и огромная площадь поверхности нагрева в виде больших пучков труб оказывается в зоне непосредственного воздействия горячих газов. На рис. 1.3 показан типичный котельный агрегат, который имеет высоту около 60 м, а стоит около 10 млн. долларов.

Термин *парогенератор* часто употребляют применительно к котлам, в которых источником тепла служат не горячие продукты сгорания, а поток другого теплоносителя. В качестве типичного примера можно привести парогенератор для ядерной энергетической установки с реактором, охлаждаемым водой под

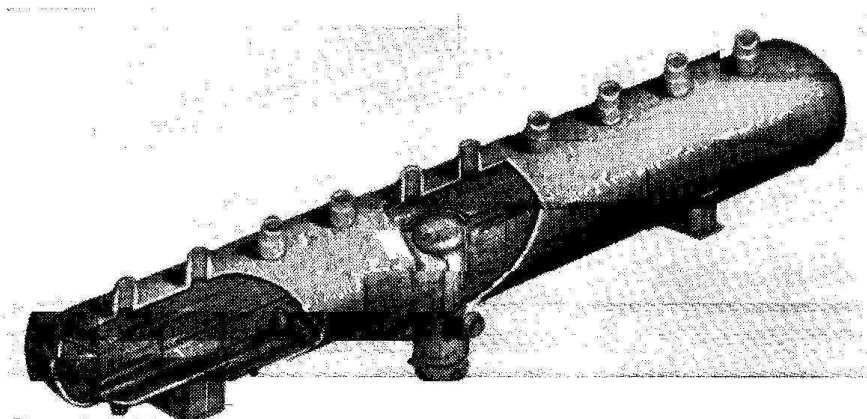


Рис. 1.4. Парогенератор диаметром 3 м, длиной 17 м для ядерной установки с реактором, охлаждаемым водой под давлением (частично показан в разрезе). Он имеет 1916 труб внешним диаметром 0,625 дюйм (16 мм), образующих поверхность нагрева 1500 м².

давлением, показанный на рис. 1.4. Вода, выходящая из реактора при высокой температуре и под большим давлением, циркулирует по U-образным трубам диаметром 12,7 мм, расположенным коаксиально по отношению к кожуху парогенератора. В межтрубном пространстве под действием естественной конвекции циркулирует снизу вверх кипящая вода, проходящая через матрицу труб, где образуется пар при температуре, несколько меньшей, и давлении, значительно меньшем, чем в циркуляционном контуре воды под высоким давлением в реакторе. Совершенно другой тип парогенераторной установки для большого реактора, охлаждаемого газом низкого давления, показан на рис. 1.5. Восемь подобных многоходовых противоточных установок работают с каждым из четырех реакторов на атомной станции в Хинкли-Пойнт, Англия. Следует отметить, что тепло отбирается от газа в семь ступеней. Такая необычная конструкция обусловливается ограничениями, накладываемыми на рабочую температуру реактора, вследствие чего оказалось целесообразным применить две системы генерации пара — одну при умеренно большом давлении, другую при более низком, для того чтобы отобрать как можно больше тепла от газа, циркулирующего через реактор [2].

Конденсаторы. В свое время Джеймс Уатт более чем в три раза повысил термический к. п. д. паровых машин, применив конденсаторы для того, чтобы пар конденсировался не в цилиндрах машины, а вне их.

Конденсаторы пара для современных мощных турбин сконструированы в большинстве случаев почти аналогично конденсаторам Уатта, отличаясь от последних в основном гораздо большими размерами. На рис. 1.6 показан

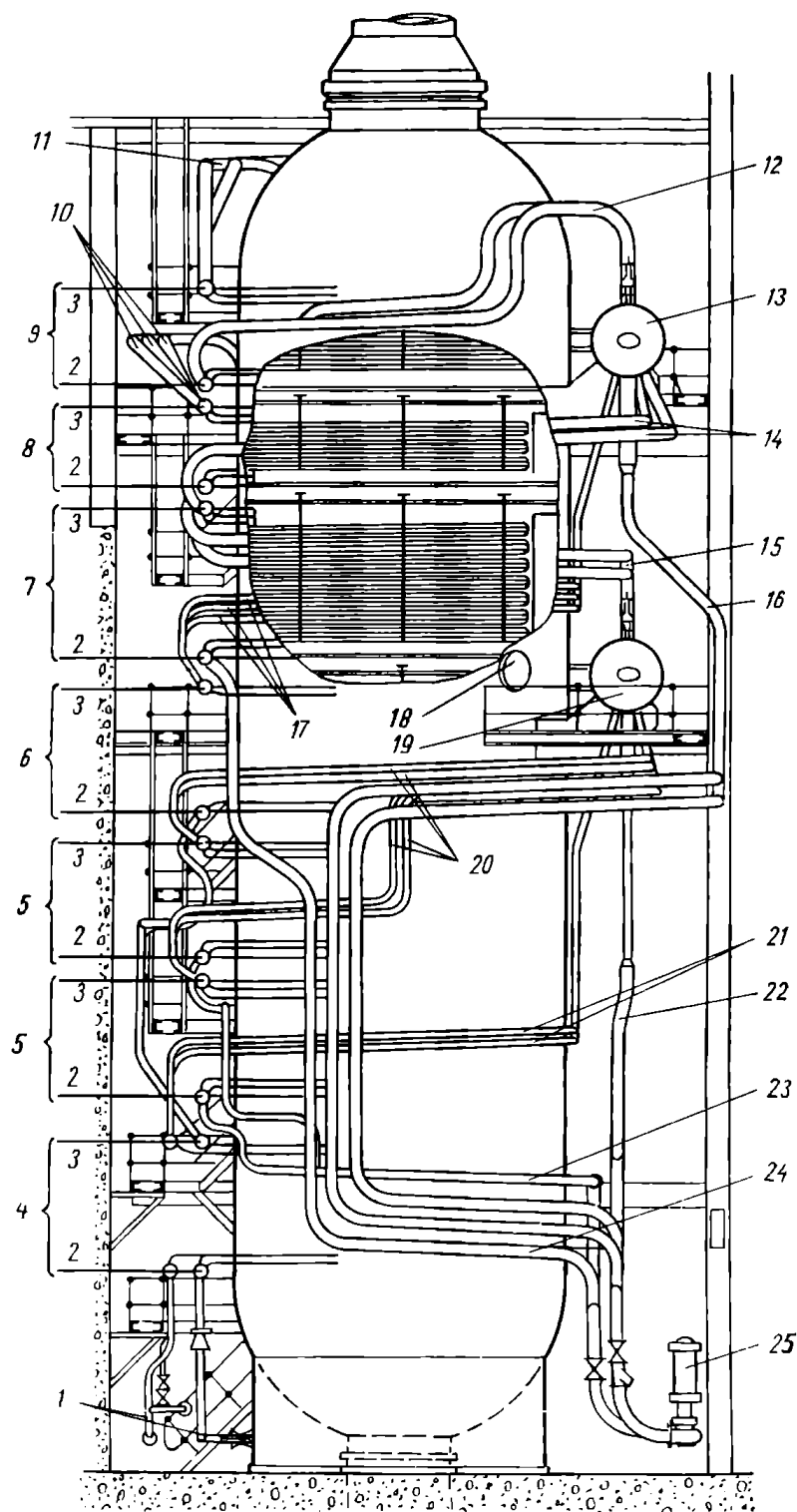


Рис. 1.5. Разрез парогенератора для атомной электростанции в Хинкан-Пойнт с реактором, охлаждаемым циркулирующим газом. Диаметр кожуха 6,5 м, высота 27 м. Газ CO_2 под давлением 12,6 атм проходит через межтрубное пространство с расходом 780 кг/сек при потере давления 0,11 атм, отбирая 164 Мвт тепла:

1 — подвод питательной воды; 2 — входной коллектор; 3 — выходной коллектор; 4 — экономайзер низкого и высокого давления; 5 — котел низкого давления; 6 — экономайзер высокого давления и высокой температуры; 7 — котел высокого давления; 8 — пароперегреватель низкого давления; 9 — пароперегреватель высокого давления; 10 — пар низкого давления; 11 — пар высокого давления; 12 — паропроводы насыщенного пара высокого давления; 13 — барабан высокого давления; 14 — соединение котла высокого давления с барабаном; 15 — паропроводы насыщенного пара низкого давления; 16 — соединение линии высокого давления с циркуляционными насосами; 17 — соединение экономайзера с барабаном котла; 18 — газ; 19 — барабан низкого давления; 20 — соединение котла низкого давления с барабаном; 21 — соединение экономайзера низкого давления с барабаном; 22 — соединение линии низкого давления с циркуляционными насосами; 23 — соединение циркуляционного насоса с котлом низкого давления; 24 — соединение циркуляционного насоса с котлом высокого давления; 25 — циркуляционные насосы котла.

типичный современный конденсатор, который включает в себя 21850 труб общей длиной почти 300 000 м.

Кожухотрубные теплообменники. Основу теплообменных аппаратов, называемых кожухотрубными, составляют круглые трубы, заключенные в цилиндрический кожух так, что оси труб и кожуха параллельны. Такие теплообменники используются в качестве самых различных нагревателей и холодильников, включая маслоохладители в энергетических установках и технологические аппараты в нефтеперерабатывающей и химической промышленности. Существует множество вариантов теплообменников такого типа, отличающихся

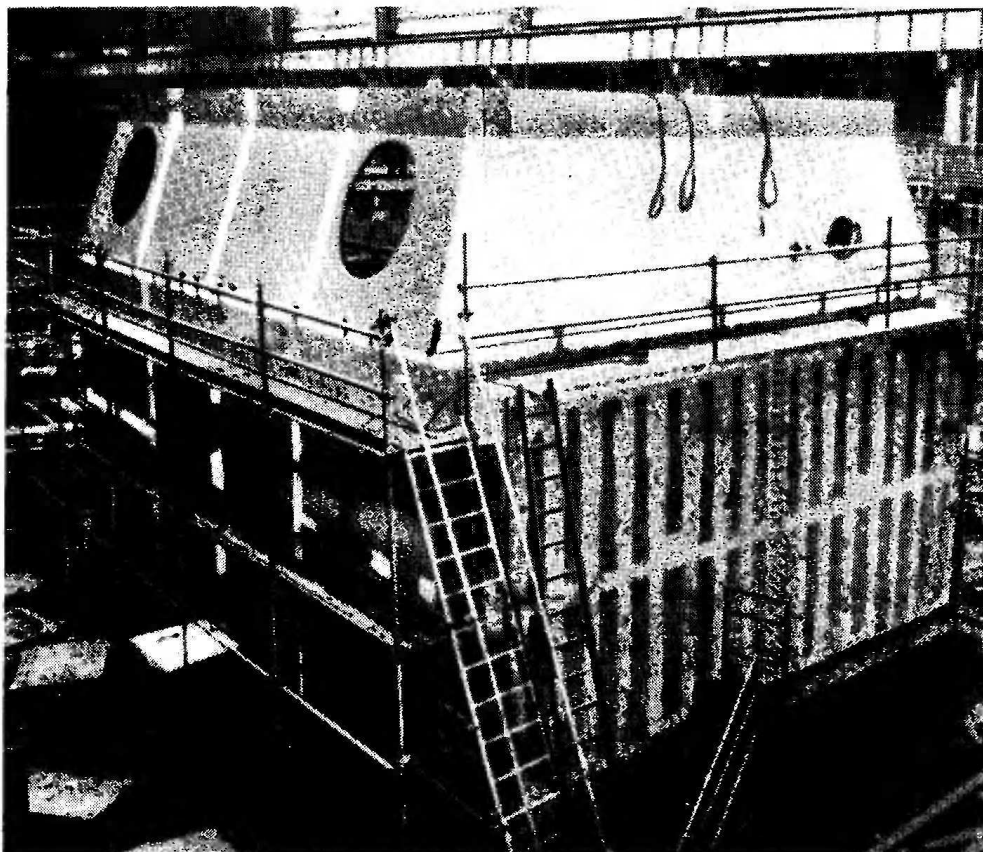


Рис. 1.6. Фотография монтажа оборудования для одноходового конденсатора паровой турбины мощностью 300 Мвт. Он содержит 21850 труб наружным диаметром 3/4 дюйма (19,05 мм) и длиной 12 м, образующих поверхность теплообмена 15 900 м².

друг от друга главным образом деталями конструкции узла соединения труб с кожухом и способом компенсации разницы теплового расширения труб и кожуха [3, 4].

Чтобы отчетливее пояснить проблемы, которые возникают при проектировании теплообменника, на рис. 1.7—1.13 представлено несколько типичных аппаратов. На рис. 1.7 изображен кожухотрубный аппарат с перегородками и одним ходом в кожухе, схема движения теплоносителей в котором показана на рис. 1.1, а и приближается к условиям чистого противотока. В аппарате, показанном на рис. 1.8, для упрощения конструкции использованы U-образные трубы, поэтому схема движения теплоносителей в нем еще более отличается от чисто противоточной. Аппарат, изображенный на рис. 1.9, имеет схему движения, подобную схеме движения аппарата на рис. 1.8. Но конструкция его усложнена, поскольку она приспособлена для механической очистки внутренней поверхности труб, проверки их исправности и замены поврежденных труб новыми. Однако такая конфигурация не рассчитана на работу

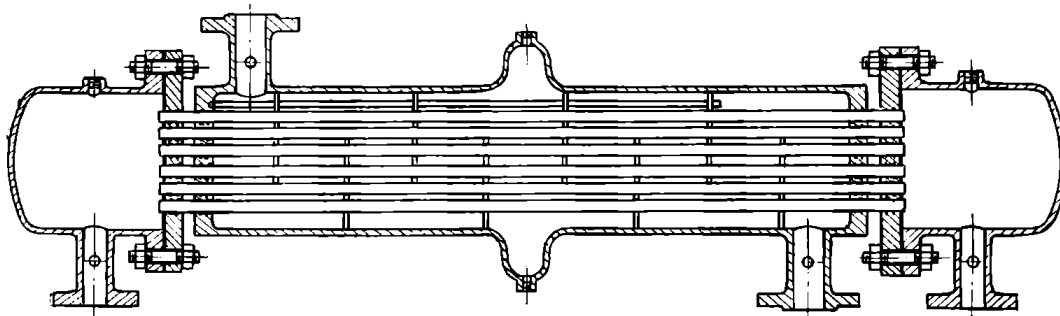


Рис. 1.7. Кожухотрубный теплообменник с одним ходом в трубках и одним ходом в снабженном перегородками кожухе. Конструкция теплообменника обеспечивает противоточную схему движения. Торoidalный расширительный шов в центре кожуха компенсирует разность тепловых расширений труб и кожуха, а двойные трубные доски коллектора исключают возможность утечек из одной циркуляционной линии в другую.

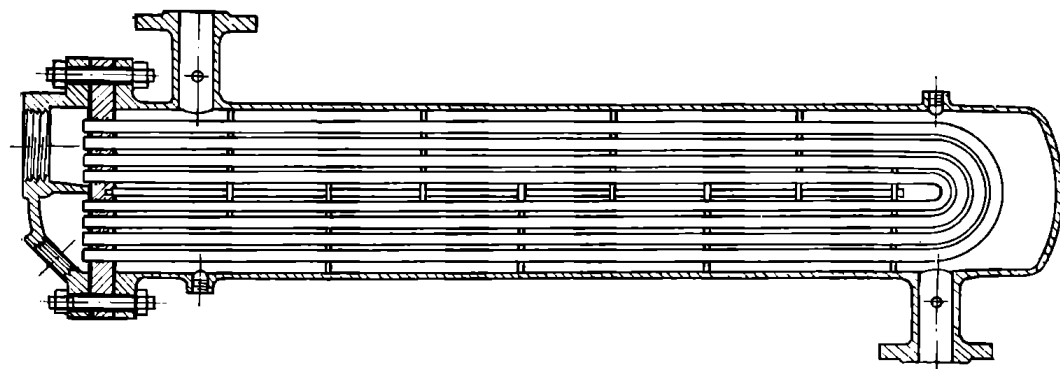


Рис. 1.8. Кожухотрубный теплообменник с U-образными трубками и снабженным перегородками одноходовым кожухом.

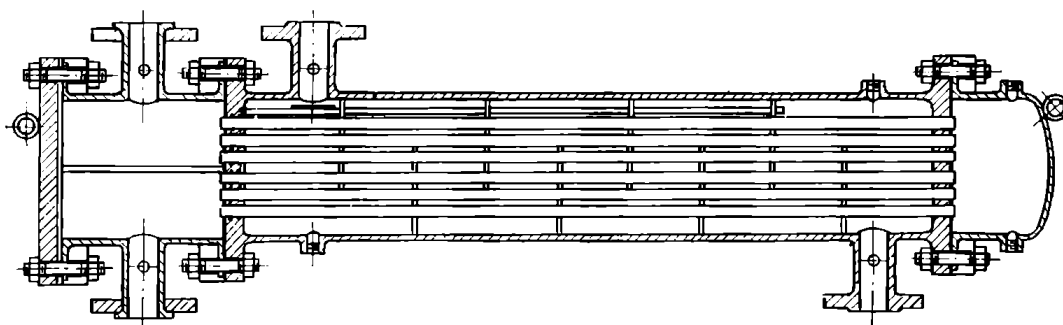


Рис. 1.9. Кожухотрубный теплообменник с двумя ходами в трубках и одним ходом в снабженном перегородками кожухе.

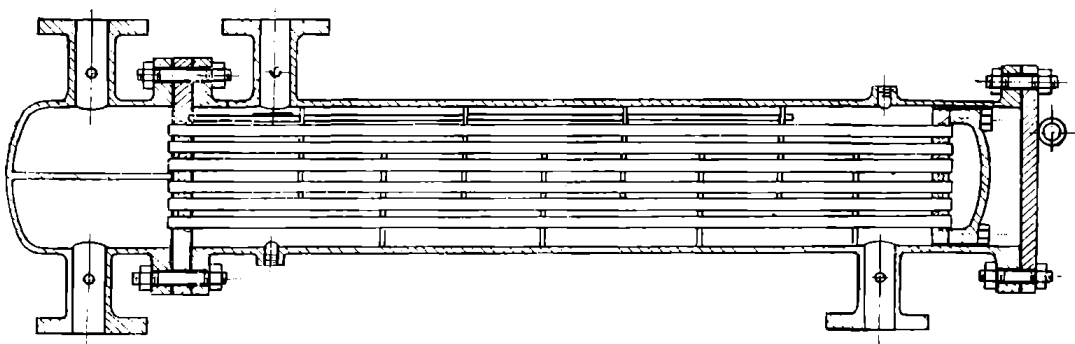


Рис. 1.10. Теплообменник, аналогичный изображенному на рис. 1.9, но с плавающим коллектором для компенсации разность тепловых расширений труб и кожуха.

в условиях различного теплового расширения кожуха и труб. Для работы в условиях больших разностей температур теплоносителей применяют аналогичный, но более сложный теплообменник, изображенный на рис. 1.10. Он почти так же хорошо приспособлен к восприятию больших разностей температур потоков теплоносителей, как и аппарат на рис. 1.8, в котором U-образный изгиб

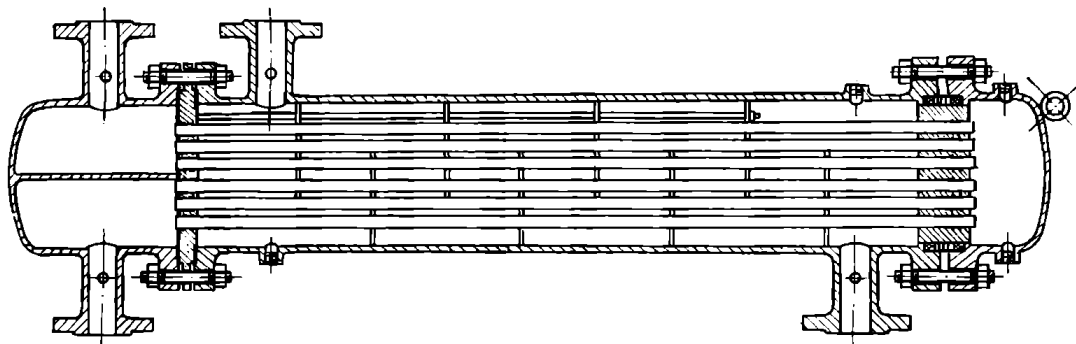


Рис. 1.11. Теплообменник, аналогичный изображенному на рис. 1.10, но с иной конструкцией плавающего коллектора.

компенсирует не только различное тепловое расширение труб и кожуха, но также и отдельных труб в том случае, если распределение температур в них неравномерно.

Часто возникают затруднения, связанные с внутренними утечками через уплотнения вокруг трубной доски плавающего коллектора с правого конца аппарата на рис. 1.10. Перетекание из одного потока в другой может быть устранено в конструкции, показанной на рис. 1.11. Утечку в любой жидкости через уплотнение плавающего коллектора можно непосредственно обнаружить, так

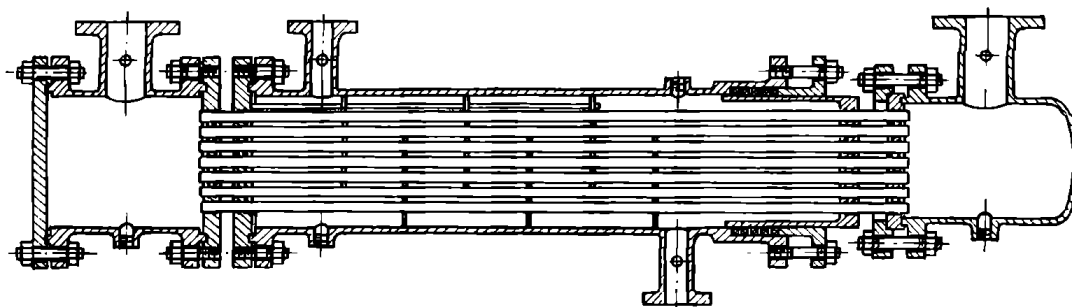


Рис. 1.12. Кожухотрубный теплообменник с одним ходом в трубах и в снабженном направляющими перегородками кожухе; плавающий коллектор с двумя трубными досками, имеющий сальниковое уплотнение, позволяет полностью исключить попадание теплоносителей из одного циркуляционного контура в другой.

как она попадает во внешнее по отношению к кожуху пространство, что позволяет избежать загрязнения потока другого теплоносителя. Дальнейшая модификация этого типа теплообменника показана на рис. 1.12. Она отличается от предыдущей только более удачной конструкцией сальникового уплотнения плавающего коллектора. В этой конструкции приняты меры для уменьшения утечки жидкости со стороны кожуха, а сальниковое уплотнение со стороны трубного хода заменено кольцевым уплотнением, утечка через которое гораздо меньше, так как ему не приходится участвовать в движении скольжения при расширении.

Теплообменники кожухотрубного типа можно легко приспособить для использования в специальных целях, когда аппарат должен быть изготовлен из стекла во избежание воздействия сильноагрессивных жидкостей и т. п. Теплообменник такой конструкции для процессов, в которых осуществляется

регенеративное нагревание и охлаждение агрессивных жидкостей, показан на рис. 1.13. В этом случае трубные доски коллектора и направляющие перегородки сделаны из керамики с высоким содержанием алюминия. Чаше аппараты, предназначенные для подобной цели, делаются коррозионно устойчивыми только со стороны труб, по которым движется агрессивная жидкость, а для нагревания или охлаждения используется пар или вода, которые движутся в межтрубном пространстве. В таком случае кожух и направляющие

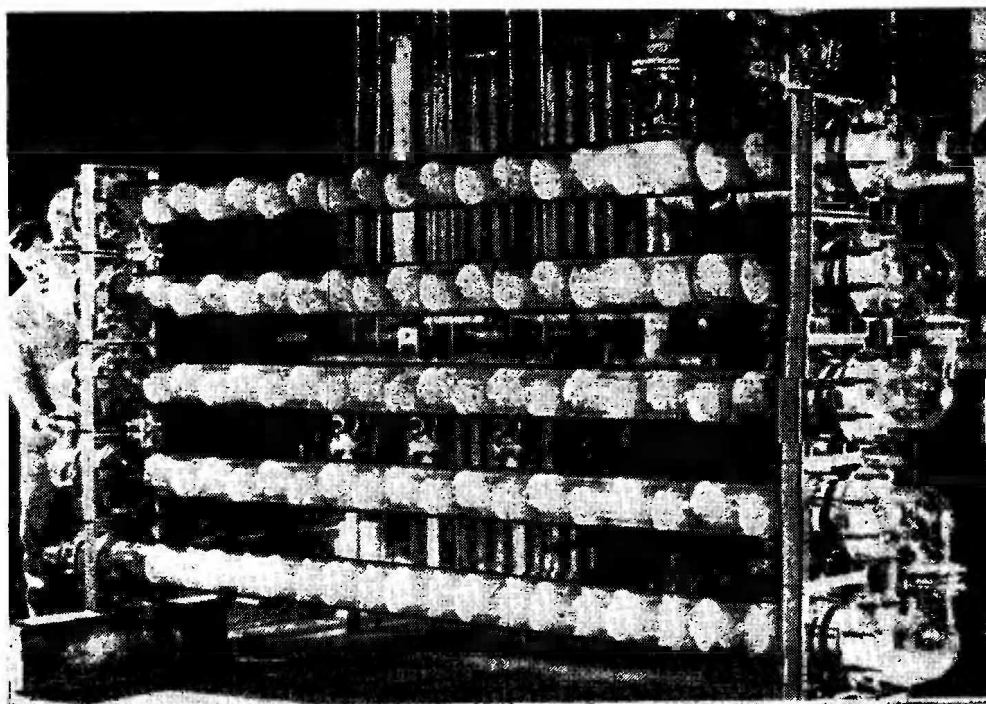


Рис. 1.13. Фотография кожухотрубного теплообменника из стекла пирекс, служащего в качестве химического реактора.

перегородки, как и в обычных условиях, изготавливают из стали, предусматривая компенсацию разницы теплового расширения.

Холодильники. Атмосфера является удобным тепловым стоком в случаях, когда необходимо отводить тепло от охлаждаемого объекта, температура которого на $\sim 50^\circ \text{C}$ или больше превышает температуру окружающей среды или когда нет достаточного количества охлаждающей воды. Указанные обстоятельства имеют место при работе нефтеочистительных установок в безводных районах, силовых установок в арктических районах (где трудности связаны с замерзанием воды) и силовых установок транспортных устройств. В охлаждающих системах промышленных установок жидкость, которую необходимо охладить, обычно циркулирует через пучки оребренных труб, как это показано на рис. 1.14. Подобные устройства могут быть смонтированы в воздуховодах внутри установки или (когда требуется отвести большие количества тепла) на открытых местах. В последнем случае охлаждающий вентилятор устанавливается так, чтобы он прогонял воздух вертикально вверх, как показано на рис. 1.15, благодаря чему получается недорогая система с минимальными затратами мощности на циркуляцию воздуха. Кроме того, эффективность такой установки не зависит от скорости и направления ветра.

Установки типа, показанного на рис. 1.14, используются в качестве холодильников или нагревателей в системах кондиционирования воздуха в зданиях или в промышленных установках, в которых воздух или газы необходимо охлаждать и нагревать в пределах температурного интервала 280°C .

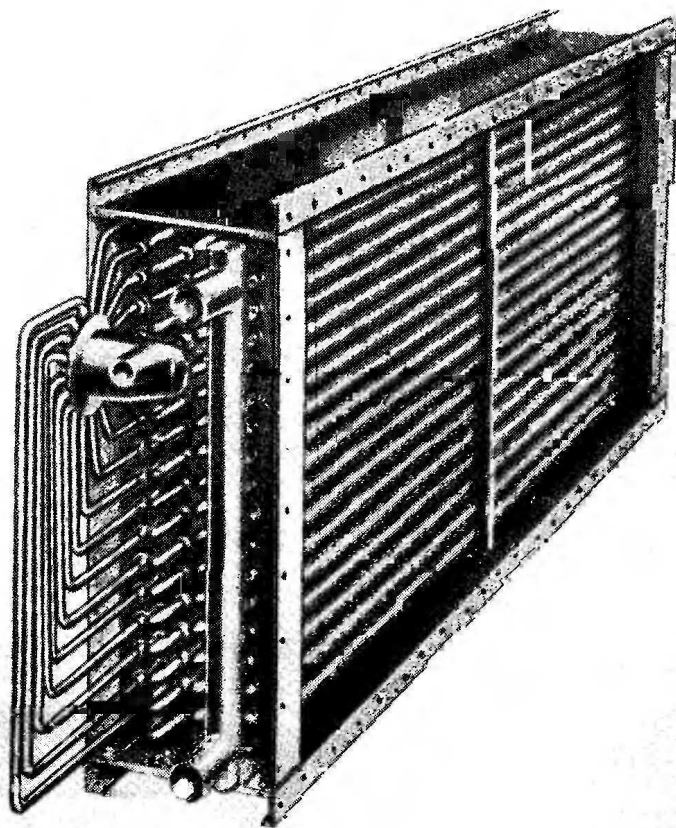


Рис. 1.14. Пакет оребренных труб для большой системы кондиционирования воздуха.

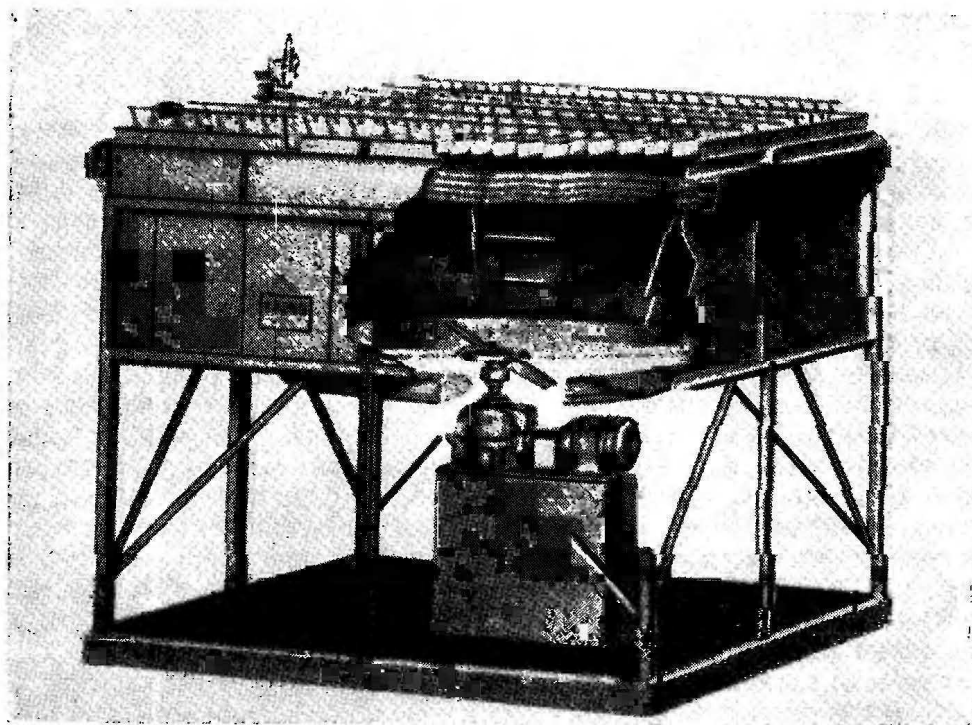


Рис. 1.15. Большой пакет охлаждаемых воздухом оребренных труб, предназначенный для установки на открытом воздухе.