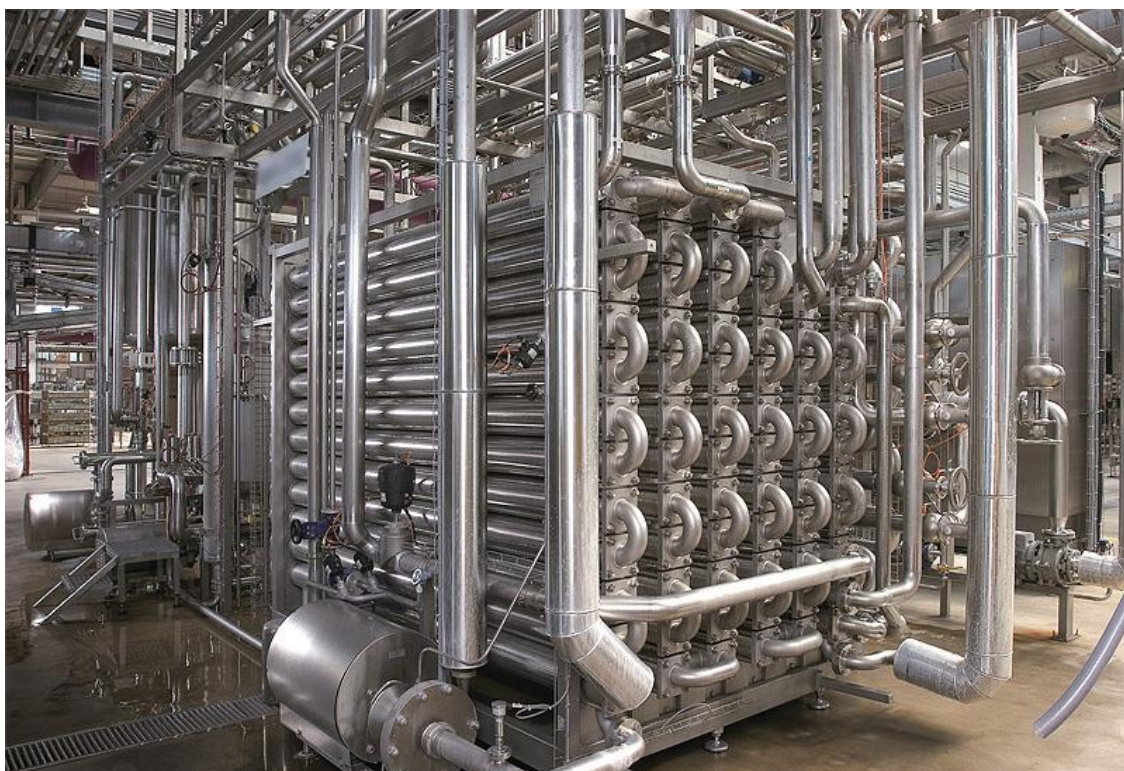


**Н. В. АЛЕКСЕЕВА, Е. В. РОМАНОВА, Р. А. ШУБИН**

# **ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**



**Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

**Н. В. АЛЕКСЕЕВА, Е. В. РОМАНОВА, Р. А. ШУБИН**

# **ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Утверждено Ученым советом университета  
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся  
по направлениям 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго-  
и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии  
и биотехнологии», 21.03.01 «Нефтегазовое дело»,  
очной и заочной форм обучения

*Учебное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023

УДК 66.045.1

ББК 35.112

А47

Рецензенты:

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

*А. В. Рухов*

Кандидат технических наук,  
начальник лаборатории «Технологии надперекисей, регенеративных продуктов и их утилизации» АО «Корпорация «Росхимзащита»

*Р. В. Дорохов*

А47 **Алексеева, Н. В.**

Теплообменное оборудование химико-технологических производств [Электронное издание] : учебное пособие / Н. В. Алексеева, Е. В. Романова, Р. А. Шубин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 3,45 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2575-3

Содержит теоретические основы, раскрывающие особенности теплообменных процессов, даны рекомендации по аппаратурному оформлению и расчету оборудования. Приведена классификация теплообменных аппаратов по: целевому назначению; числу фаз и компонентов в теплообменных аппаратах; числу и направлению взаимодействующих потоков; характеру и структуре движущихся потоков.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 21.03.01 «Нефтегазовое дело», очной и заочной форм обучения.

УДК 66.045.1

ББК 35.112

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2575-3

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

## ВВЕДЕНИЕ

---

В будущей профессиональной деятельности бакалавров направлений подготовки «Химические технологии» и «Нефтегазовое дело» важнейшее значение имеет знание тепловых процессов и соответствующего аппаратного оформления.

При составлении пособия, выборе структуры, содержания, иллюстрационного материала предполагается, что содержание охватывает основные типы теплообменных аппаратов, используемых в химико-технологических производствах. Особое внимание уделено классификации теплообменных аппаратов по: целевому назначению; числу фаз и компонентов в теплообменных аппаратах; числу и направлению взаимодействующих потоков; характеру и структуре движущихся потоков.

Цель учебного пособия – закрепление знаний по тепловым процессам и аппаратам, анализ их работы.

Каждая глава учебного пособия содержит теоретическую часть, раскрывающую особенности рассматриваемого технологического процесса, рекомендации по аппаратному оформлению и расчету оборудования, что поможет студентам самостоятельно и успешно решать профессиональные задачи.

Закрепить знания по каждой теме способствуют контрольные вопросы, данные в конце каждой главы.

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

Теплообменные процессы – это процессы, скорость протекания которых определяется законами теплопередачи. Простыми теплообменными процессами являются нагревание, охлаждение, конденсация паров, испарение жидкостей, к сложным процессам относятся выпаривание. В зависимости от осуществляемых процессов необходимы соответствующие аппараты. Простые тепловые процессы протекают в аппаратах – теплообменниках. Основной характеристикой теплообменных аппаратов является развиваемая площадь контакта теплоносителей. В любом теплообменном процессе участвуют два теплоносителя: холодный и горячий. Холодный теплоноситель в процессе прохождения по аппарату получает тепло, горячий – отдает тепло. Теплоносители в процессе осуществления процесса теплопередачи могут изменять свою температуру и агрегатное состояние. Так, при контакте с холодным теплоносителем горячий теплоноситель может охладиться и/или сконденсироваться. В свою очередь холодный теплоноситель может нагреться и/или испариться. В зависимости от количества передаваемого между теплоносителями тепла и свойств теплоносителей для проведения процесса теплопередачи необходима организация определенной площади контакта теплоносителей. Широкий ряд теплообменников различных конструкций и размеров позволяет осуществить любой теплообменный процесс.

Классификация теплообменных аппаратов зависит от ряда факторов. На выбор типа теплообменника оказывают влияние необходимый

способ передачи тепла, направление движения потоков, назначение теплообменника и его конструктивные особенности (прил. А).

В зависимости от способа передач тепла теплообменники могут быть поверхностными (при контакте теплоносителей через разделяющую стенку) и смешения (при непосредственном контакте теплоносителей). Следует отметить, что теплообменники смешения используются только для теплоносителей, позволяющих их смешение по технологическим параметрам, из-за чего наиболее распространенными являются поверхностные теплообменники.

В зависимости от способа организации направления движения взаимодействующих потоков теплообменники могут быть прямоточными (при однонаправленном движении теплоносителей), противоточными (при движении теплоносителей в противоположных направлениях) и с перекрестным током (при движении теплоносителей в перекрестных направлениях). При сравнении прямоточных и противоточных теплообменников следует отметить, что наиболее эффективными являются противоточные.

В зависимости от способа контакта теплоносителей теплообменники делятся на поверхностные и смесительные. Поверхностные теплообменники используются в случаях запрета на непосредственный контакт теплоносителей, процесс теплопередачи происходит через разделяющую стенку. При проведении процесса теплопередачи в смесительном теплообменнике теплоносители смешиваются. В свою очередь поверхностные теплообменники подразделяются на:

- рекуперативные (перенос тепла между теплоносителями происходит через разделяющую их глухую стенку);
- регенеративные (попеременный контакт теплоносителей с одной и той же стенкой или телом).

В зависимости от способа организации процесса теплообменники бывают периодические и непрерывные.

В зависимости от назначения (способу воздействия на целевой продукт) теплообменники делятся на подогреватели, кипятильники, холодильники, испарители и конденсаторы. При этом во внимание берется процесс, происходящий с целевым продуктом, и не учитывается процесс, происходящий со вторым теплоносителем.

По расположению в пространстве теплообменники могут быть вертикальными или горизонтальными. У обоих типов этих теплообменников есть свои достоинства и недостатки: горизонтальные теплообменники просты в обслуживании, но занимают много места, вертикальные теплообменники менее габаритны по занимаемой площади, но более сложны в обслуживании из-за большой высоты.

Конструктивно теплообменники делятся на аппараты, выполненные из труб (кожухотрубчатые, типа «труба в трубе», оросительные, змеевиковые, оребренные) и из листового материала (теплообменники: с рубашкой, пластинчатые, спиральные).

Основной характеристикой теплообменных аппаратов является развиваемая рабочая поверхность контакта теплоносителей. Необходимую величину площади поверхности рассчитывают на основе теплового баланса, основного уравнения теплопередачи и критериальных уравнений. На величину площади контакта влияют количество тепла, которое необходимо передать от одного теплоносителя другому, физико-химические характеристики теплоносителей, режим движения теплоносителей по аппарату и развиваемая в аппарате средняя движущая сила процесса теплопередачи.

Выбор типа и размера теплообменника основывается на технологических требованиях и результатах расчета. Расчет аппарата для проведения процесса теплопередачи заключается в определении требуемой поверхности контакта теплоносителей по основному уравнению теплопередачи:

$$Q = K\Delta t_{cp}F, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – количество передаваемого тепла, Дж/с;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t_{cp}$  – средняя движущая сила, К;  $F$  – площадь поверхности контакта теплоносителей, м<sup>2</sup>.

Основную сложность в расчете составляет определение коэффициента теплопередачи  $K$ , который зависит от коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и теплопроводных свойств разделяющей перегородки  $\lambda$ :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{г}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{х}}}, \quad (1.2)$$

где  $\alpha_{г}$  – коэффициент теплоотдачи горячего теплоносителя, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{х}$  – коэффициент теплоотдачи холодного теплоносителя, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_{ст}$  – толщина стенки, м;  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м<sup>3</sup>·К).

Коэффициенты теплоотдачи среды вычисляются по величине критерия Нуссельта  $Nu$ , который в свою очередь зависит от свойств и режима движения среды:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (1.3)$$

где  $l$  – характеризующий геометрический размер, м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи теплоносителя, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м<sup>3</sup>·К).

Схема выбора уравнения для расчета критерия Нуссельта приведена в прил. Б.

В результате расчета получается значение площади поверхности, исходя из которой, можно подобрать по каталогам существующий теплообменник или спроектировать специальный.



## 2. РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

---

Рекуперативные теплообменники являются наиболее распространенными теплообменными аппаратами в промышленности. Контакт теплоносителей через разделяющую стенку позволяет проводить процесс теплопередачи с различными средами, обеспечивая процесс переноса тепла без прямого контакта теплоносителей. В зависимости от вида теплоносителей рекуперативные теплообменники делятся на следующие группы:

- 1) газовые;
- 2) жидкостные;
- 3) газожидкостные;
- 4) парожидкостные.

В газовых рекуперативных теплообменниках в качестве теплоносителей используются различные газы, например, в воздушных холодильниках природного газа в качестве холодного теплоносителя используется воздух. Жидкостные рекуперативные теплообменники предназначены для осуществления процесса теплопередачи между двумя жидкостями (изменения агрегатного состояния жидкостей при этом не происходит). В отличие от жидкостных теплообменников, в парожидкостных осуществляется теплообмен между паром и жидкостью при одностороннем или двухстороннем изменении агрегатного состояния теплоносителей. Так, в парожидкостных подогревателях происходит нагрев жидкости при конденсации греющего пара, а в парожидкостных кипятильниках – образование из жидкости парожидкостной смеси. Газожидкостные теплообменники предназначены для проведения процесса теплообмена между газом и жидкостью, например нагрев промежуточного жидкого теплоносителя дымовыми

газами в конвективном теплообменнике. Большое разнообразие конструкций позволяет осуществить любой, требуемый в производстве, процесс теплопередачи. Рассмотрим подробнее каждый вид рекуперативных теплообменников.

## **2.1. ЖИДКОСТНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ**

В жидкостных теплообменниках горячим и холодным теплоносителем является жидкость. Тепло в этих теплоносителях передается от горячей жидкости к холодной жидкости через разделяющую стенку.

Теплообменники широко используются в различных отраслях промышленности:

- в системах теплоснабжения в качестве подогревателей;
- для охлаждения масла водой в системах смазки подшипников паровых турбин и компрессорных машин;
- для подогрева жидкого топлива;
- для нагревания и охлаждения различных растворов в технологических процессах химической, пищевой и других отраслях промышленности.

В качестве примера использования водо-водяных теплообменников приведена принципиальная схема непрерывно действующей ректификационной установки на рис. 2.1.

По технологическому назначению и конструктивному оформлению жидкостные теплообменные аппараты весьма разнообразны. Большинство из них являются кожухотрубчатыми, также используются пластинчатые теплообменники, состоящие из гофрированных пластин с различной формой профиля, и спиральные теплообменники. Данные аппараты характеризуются высокими значениями поверхности теплообмена, компактностью и малыми габаритами, что обеспечивает целесообразность их применения и эффективность работы.

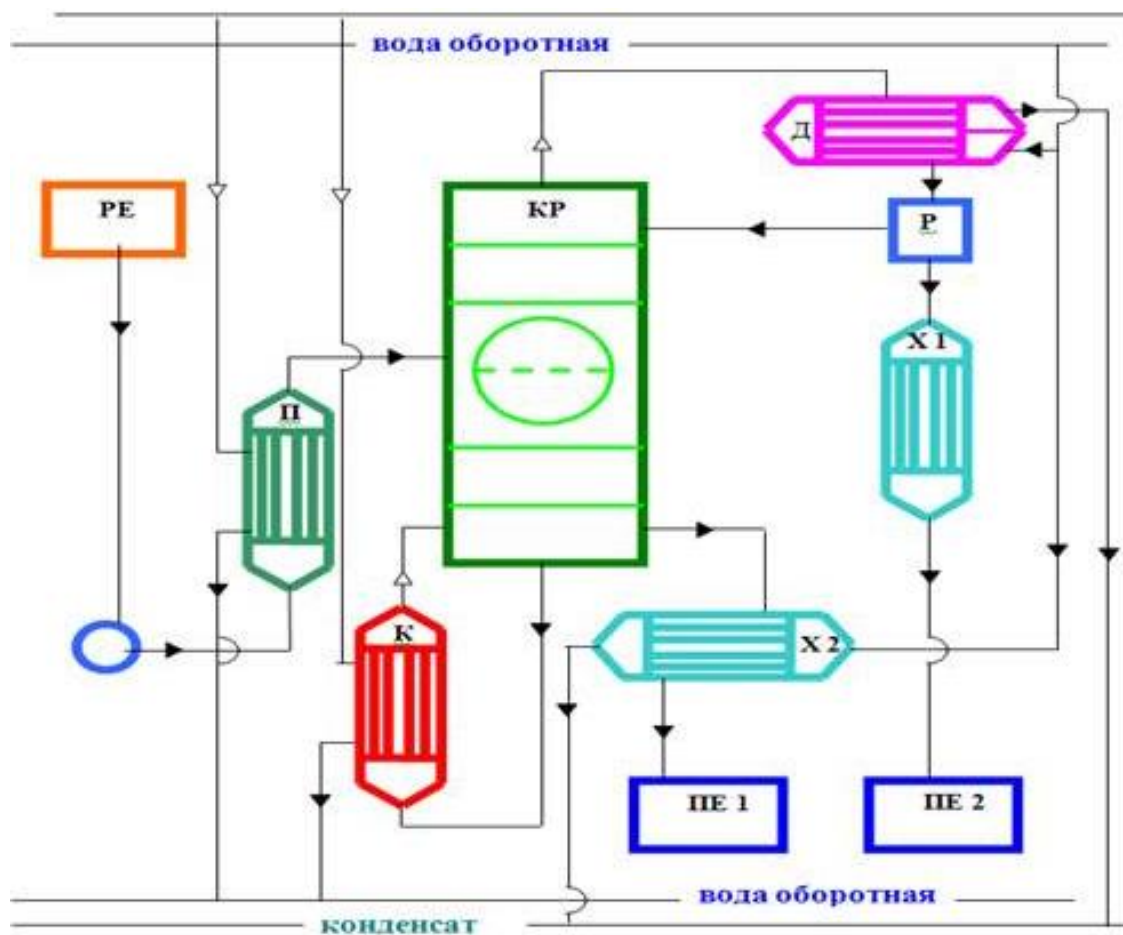


Рис. 2.1. Схема ректификационной установки

На рисунке 2.2 приведена конструкция секционного жидкостного подогревателя, применяемого в системах теплоснабжения.

Секция подогревателя состоит из цилиндрического корпуса, внутри которого расположена поверхность нагрева из латунных трубок, завальцованных в трубных досках. Сетевая вода поступает через подачи горячего теплоносителя, проходит внутри трубок последовательно по всем секциям аппарата. Нагреваемая вода поступает через патрубок подачи холодного теплоносителя и движется в межтрубном пространстве в направлении, противоположном горячему теплоносителю. Число секций и трубок определяется расчетом.

Относительно невысокие значения площади поверхности контакта теплоносителей обеспечиваются в теплообменниках типа «труба в трубе», конструкция которого приведена на рис. 2.3.

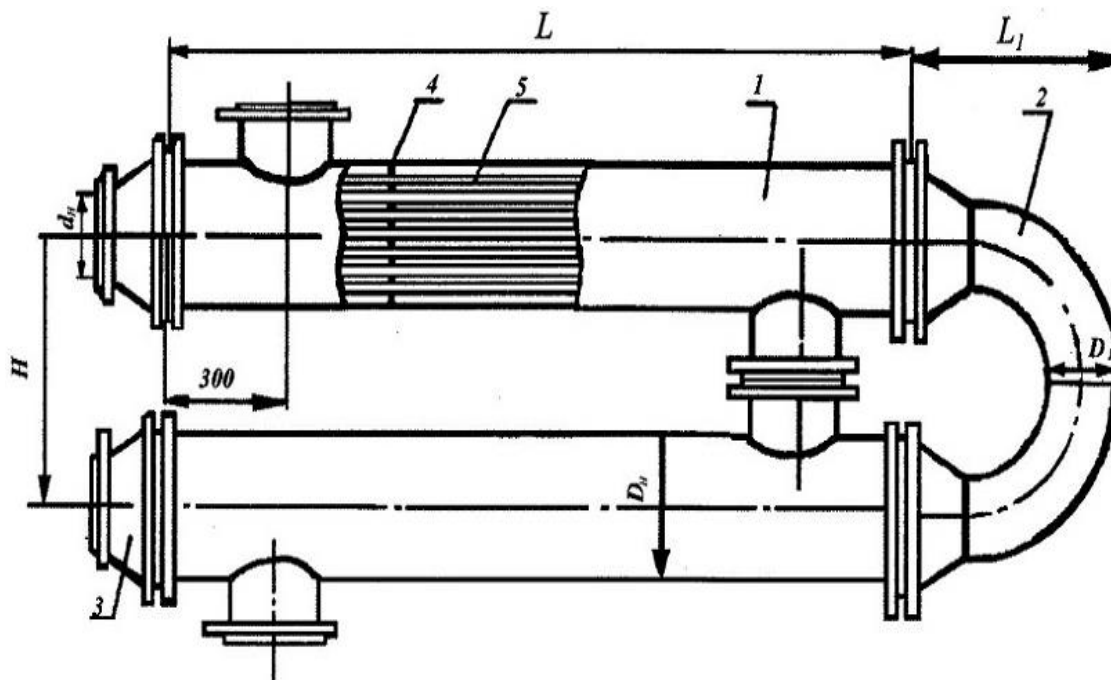


Рис. 2.2. Схема горизонтального секционного жидкостного подогревателя

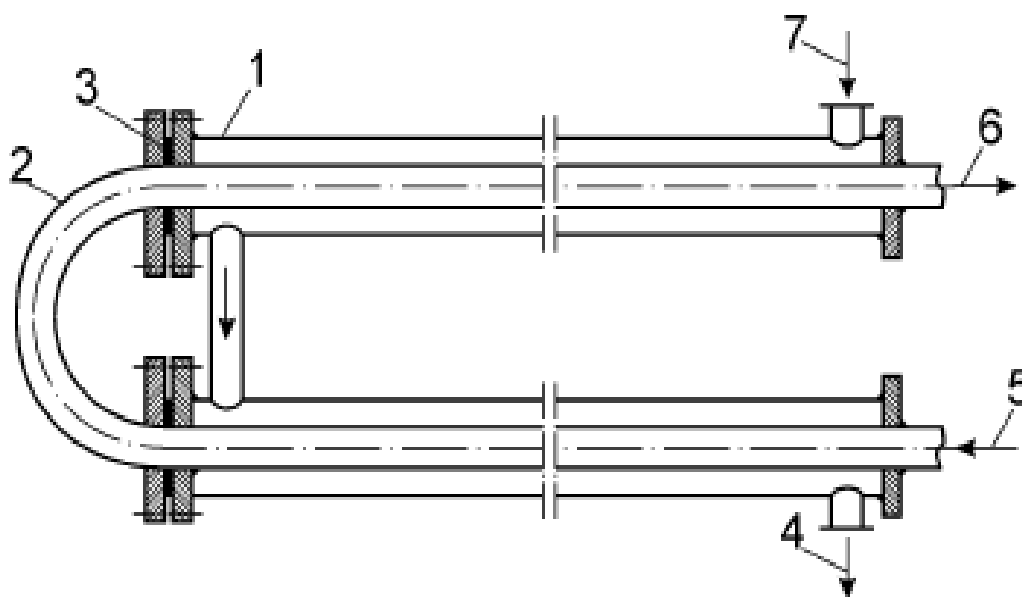
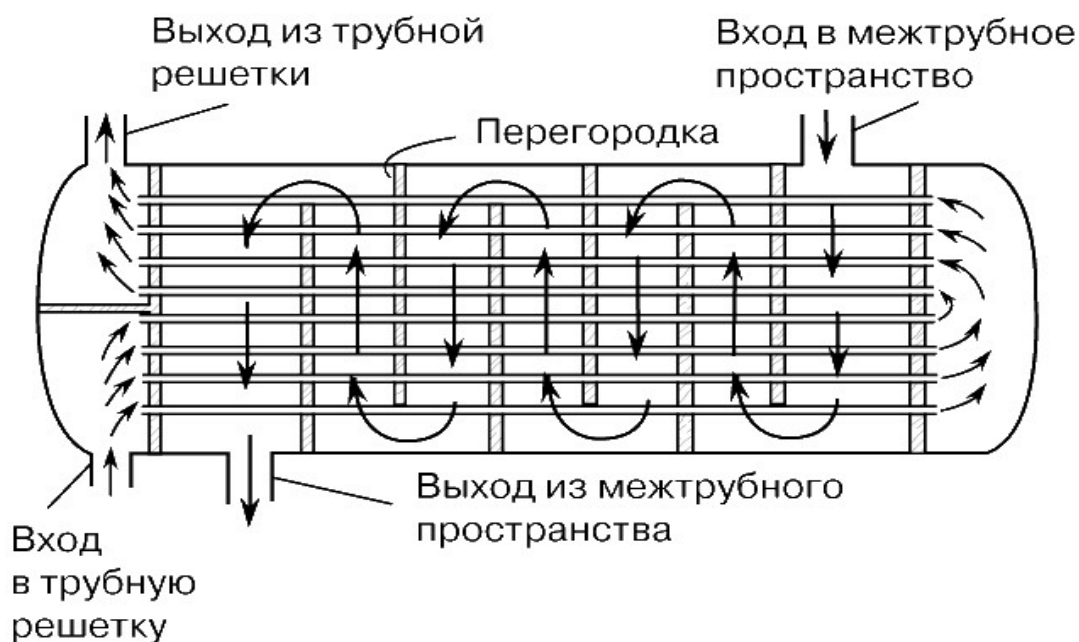


Рис. 2.3. Жидкостной подогреватель типа «труба в трубе»:

1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – сальниковое уплотнение;  
4, 7 – выход и вход нагреваемой воды; 5, 6 – вход и выход сетевой воды

Данные теплообменники могут быть изготовлены как из цельнокатаных труб, так и с помощью сварки. Поверхность нагрева одной секции составляет от 0,35 до 1,50 м<sup>2</sup> при длине труб от 3 до 6 м. В таких аппаратах допускается давление воды в кожухе и в трубе до 5...6 кг/см.



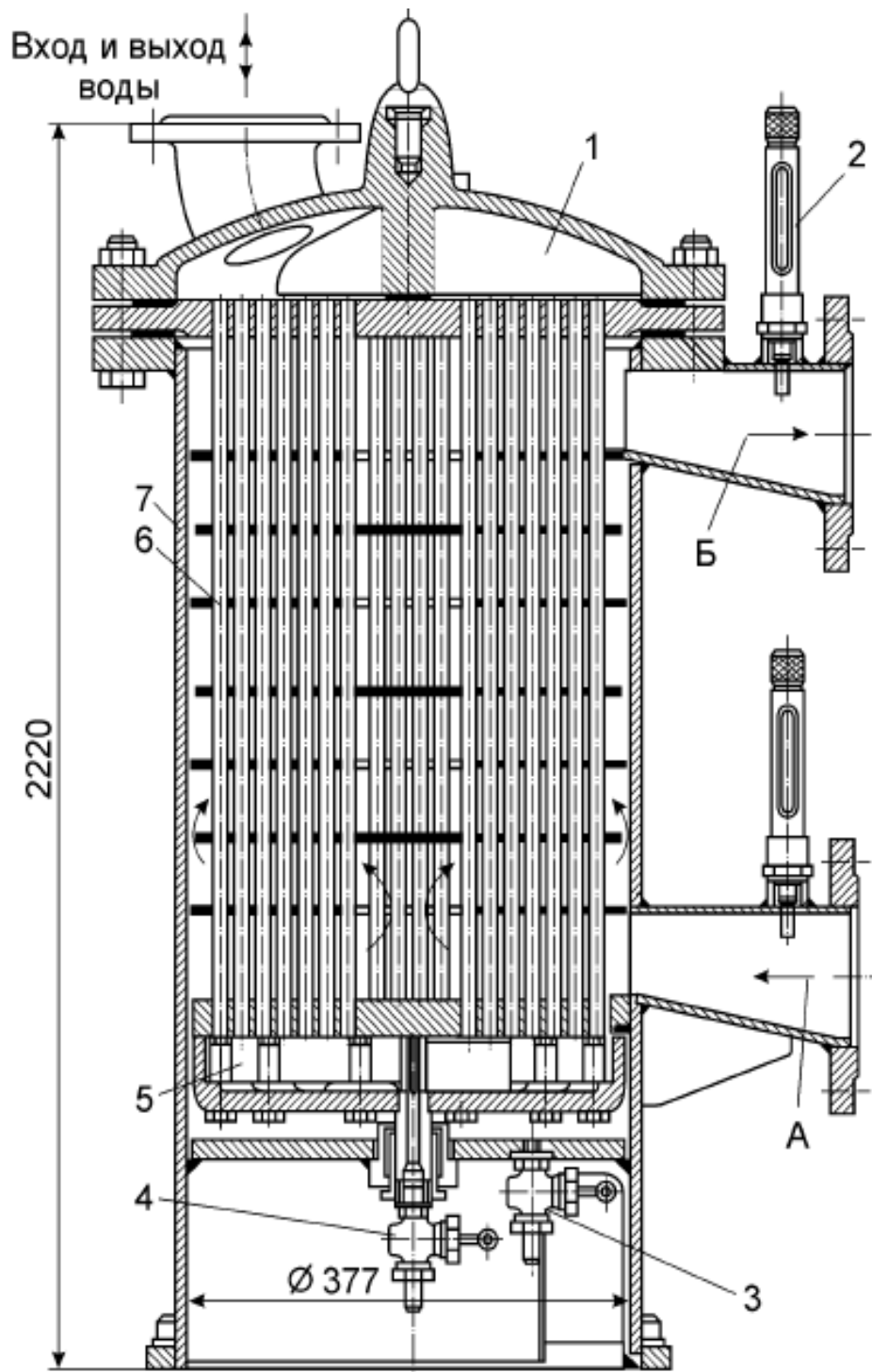
**Рис. 2.4. Схема кожухотрубчатого теплообменника**

Большая площадь поверхности развивается в кожухотрубчатом теплообменнике, принципиальная конструкция которого представлена на рис. 2.4.

Холодный теплоноситель движется внутри трубок (в трубном пространстве), а горячий теплоноситель – в пространстве между кожухом и трубками (в межтрубном пространстве). Подача обоих теплоносителей может осуществляться как с одной, так и с разных сторон. Направление движения горячего теплоносителя в межтрубном пространстве задается системой перегородок, обеспечивая поперечное обтекание потоком горячего теплоносителя трубок. Холодный теплоноситель проходит аппарат в данном случае за два хода, что обеспечивается перегородкой в камере со стороны подачи. Устанавливая перегородки в торцевых камерах, возможна организация многоходового движения теплоносителя по аппарату.

Поверхностью, разделяющей теплоносители, являются латунные трубки. Крепление трубок в трубных решетках осуществляется вальцеванием.

Часто данные теплообменники используются для охлаждения масла. На рисунке 2.5 приведена конструкция маслоохладителя Невского машиностроительного завода.

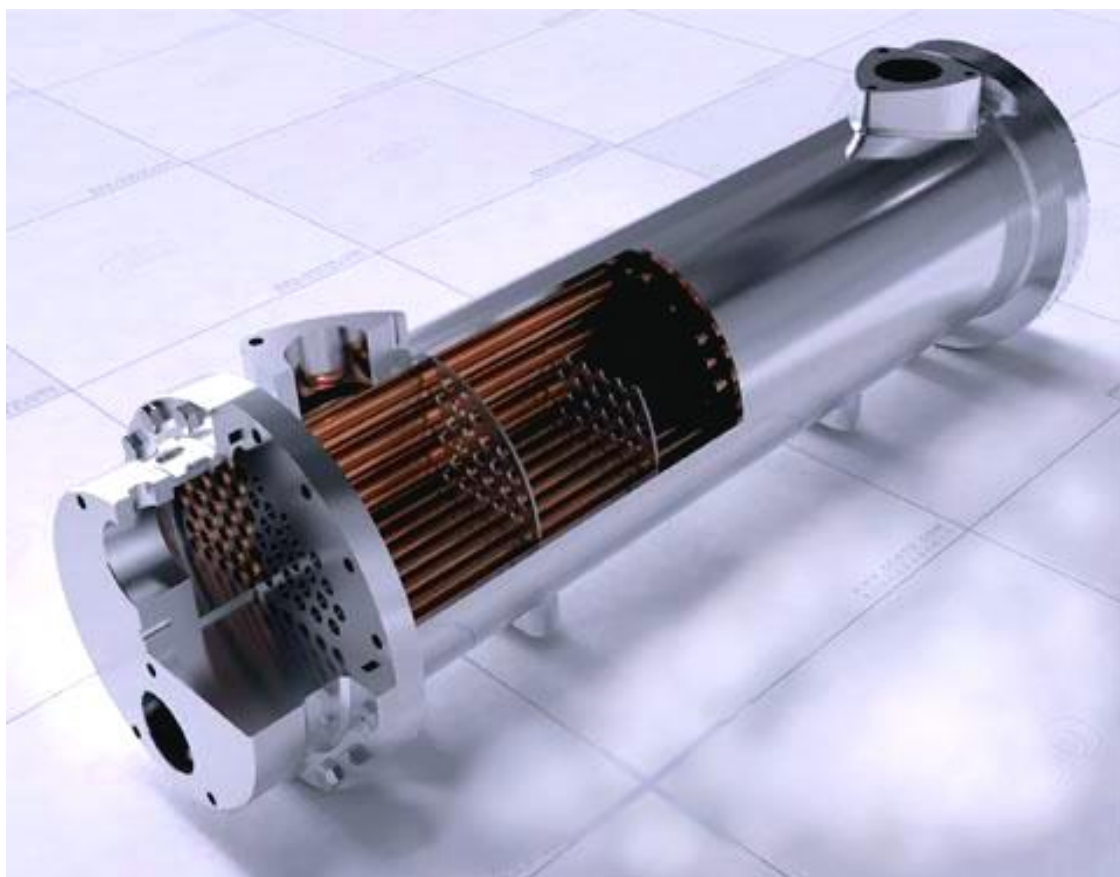


**Рис. 2.5. Маслоохладитель с подвижной нижней водяной камерой:**

- 1 – верхняя водяная камера; 2 – термометрическая гильза с оправой; 3, 4 – краны;  
 5 – нижняя водяная камера; 6 – трубная система; 7 – корпус;  
 А – вход масла; Б – выход масла

Основные конструктивные особенности этого маслоохладителя состоят в том, что подвод и отвод охлаждающей воды осуществляется сверху, а на корпусе имеется только один фланцевый разъем, аппарат выполнен в вертикальном исполнении. Компенсация температурных расширений трубной системы относительно корпуса обеспечивается за счет подвижной нижней водяной камеры, соединенной с нижней трубной решеткой. В качестве поверхности теплообмена также используются латунные трубки.

Разновидностью конструктивного оформления теплообменного аппарата является маслоохладитель в горизонтальном исполнении, схема которого представлена на рис. 2.6. Направление движения масла в межтрубном пространстве задается сегментными перегородками, по тракту воды аппарат является одноходовым.



**Рис. 2.6. Внешний вид маслоохладителя в горизонтальном исполнении**

В нем осуществлено жесткое соединение корпуса с трубной системой: трубные решетки соединены с корпусом сваркой. Трубки в трубных решетках завальцованы. Обе водяные камеры – съемные. Одним из основных недостатков описываемых теплообменников является высокое гидравлическое сопротивление.

Большая развиваемая рабочая поверхность контакта теплоносителей и компактность оборудования обусловили широкое использование кожухотрубчатых теплообменников в промышленности. Разнообразие теплоносителей с различными физико-химическими свойствами, различные технологические задачи, решаемые с помощью процессов теплопередачи, привели к разработке группы кожухотрубчатых теплообменников с некоторыми конструктивными особенностями:

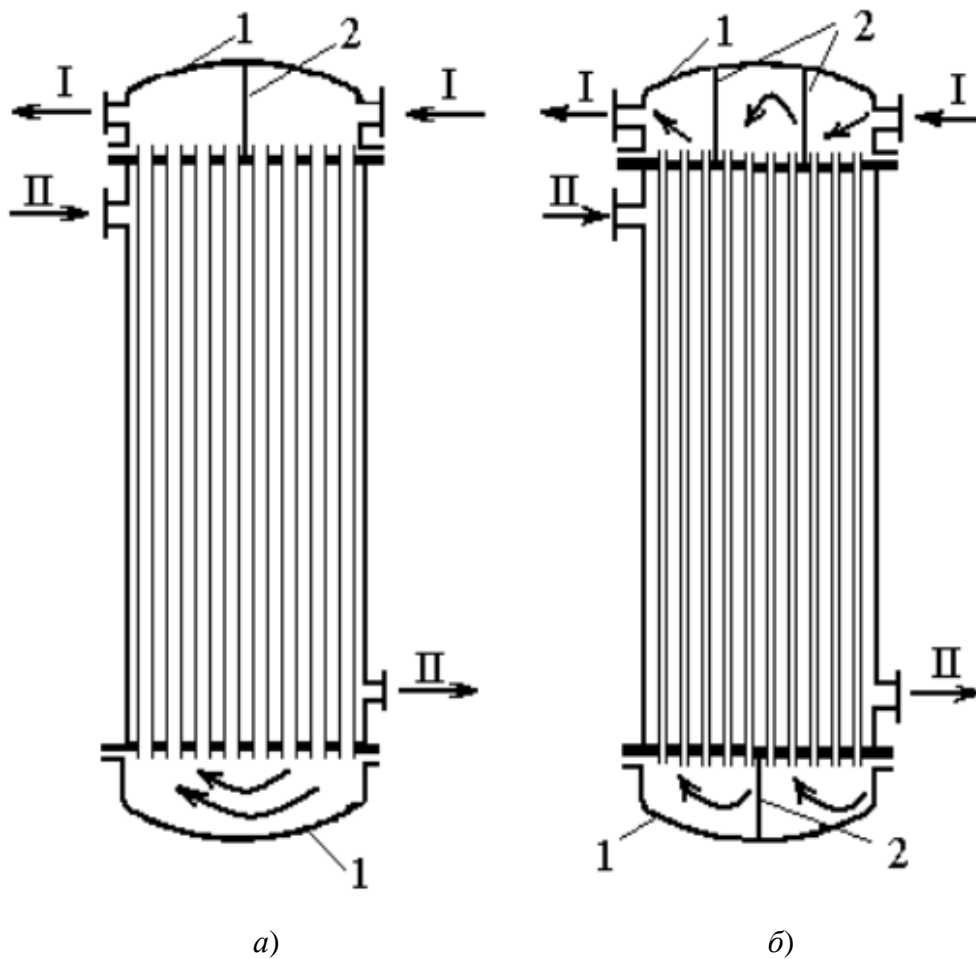
*Многоходовые кожухотрубчатые теплообменники.*

Для увеличения времени контакта одного из теплоносителей в аппарате разработаны многоходовые теплообменники. В таких аппаратах теплоноситель, находящийся в трубном пространстве, совершает несколько проходов по аппарату. Конструктивно многоходовость осуществляется расположением перегородок в торцевых частях аппарата. На рисунке 2.7 представлены схемы двух- и четырехходового теплообменников.

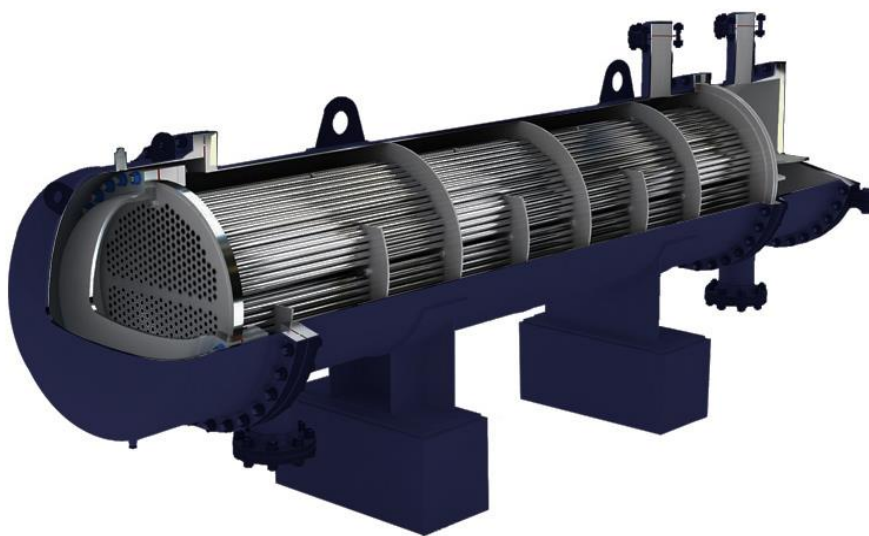
*Теплообменники с плавающей головкой.*

Как было сказано ранее, в теплообменниках осуществляется процесс передачи тепла от более нагретого тела к менее нагретому. Таким образом, существует разница температур между теплоносителями и, соответственно, через стенку аппарата. При высоких значениях перепада температур (более 50 °С) возникает деформация стенок аппарата и угроза его деформации. Для предотвращения разрушения аппарата предусмотрено подвижное крепление одной трубной решетки (плавающая головка). На рисунке 2.8 представлен общий вид описанного аппарата.





**Рис. 2.7. Схема многоходового кожухотрубчатого теплообменника:**  
*a* – двухходовой; *б* – четырехходовой; 1 – крышки и днища; 2 – перегородки;  
 I, II – теплоносители



**Рис. 2.8. Общий вид кожухотрубчатого теплообменника с плавающей головкой**

*Теплообменник с линзовым компенсатором.*

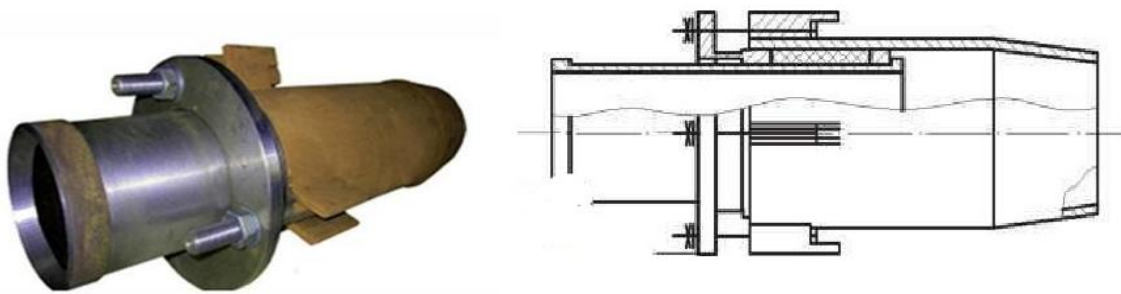
Для предотвращения температурных изменений стенок корпуса кожухотрубчатого теплообменника в конструкции аппарата предусмотрены линзовые компенсаторы, позволяющие аппарату удлиняться или укорачиваться без разрушения конструкции. На рисунке 2.9 представлен общий вид аппарата с линзовым компенсатором. Данный аппарат может использоваться при работе с невысокими давлениями в межтрубном пространстве и небольшими температурными изменениями в размерах (10...15 мм).

*Теплообменник с сальниковым компенсатором.*

Сальниковые компенсаторы относятся к старейшим компенсаторным устройствам. Кожухотрубчатые теплообменники с сальниковым компенсатором могут эксплуатироваться при высоких давлениях внутри аппарата. На рисунке 2.10 представлен общий вид и схема сальникового компенсатора.



**Рис. 2.9. Общий вид кожухотрубчатого теплообменника с линзовым компенсатором**



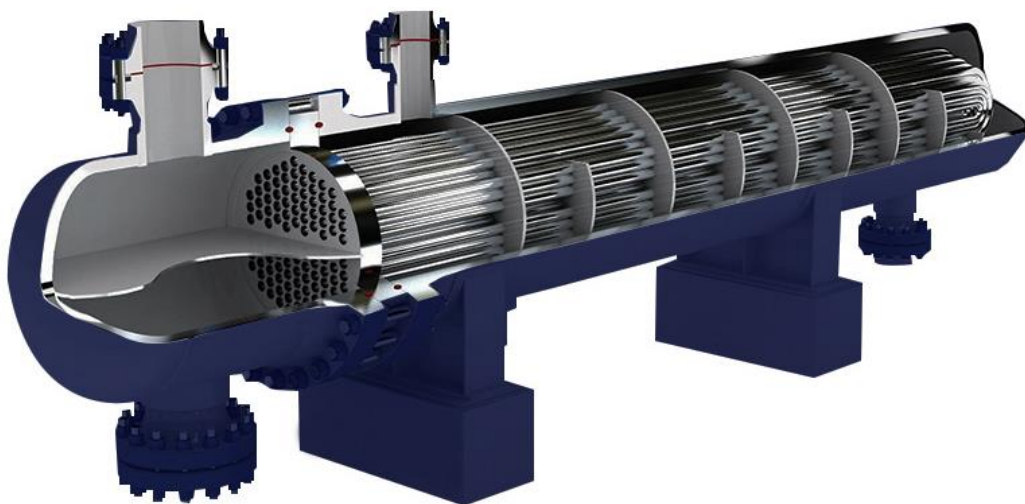
**Рис. 2.10. Общий вид и схема сальникового компенсатора**

*Теплообменник с U-образными трубами.*

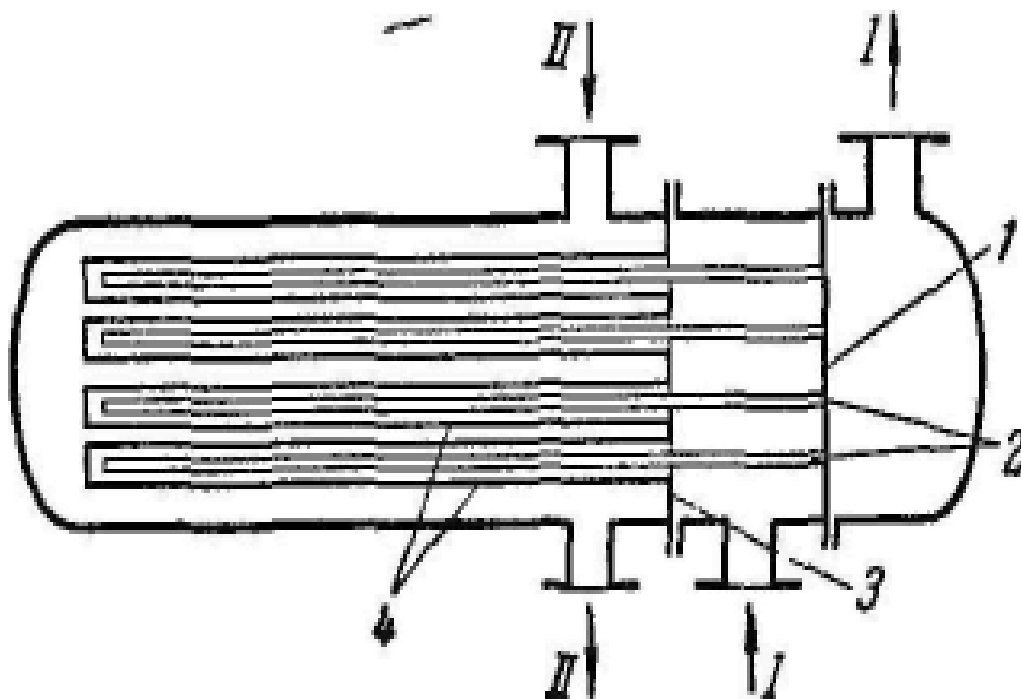
Теплообменники с U-образными трубами характеризуются наличием только одной трубной решетки, что позволяет трубкам с незакрепленной стороны менять свой линейный размер (температурная компенсация). Применение данного аппарата возможно только с чистыми средами, не образующими на стенках накипи и осадка, так как аппарат крайне сложно чистить. На рисунке 2.11 представлен общий вид кожухотрубчатого теплообменника с U-образными трубами.

*Теплообменник с двойными трубами.*

Конструкция кожухотрубчатого теплообменника с двойными трубами (рис. 2.12) предусматривает установку двух трубных решеток: одна – для наружных труб, вторая – для внутренних труб.



**Рис. 2.11. Общий вид кожухотрубчатого теплообменника с U-образными трубами**



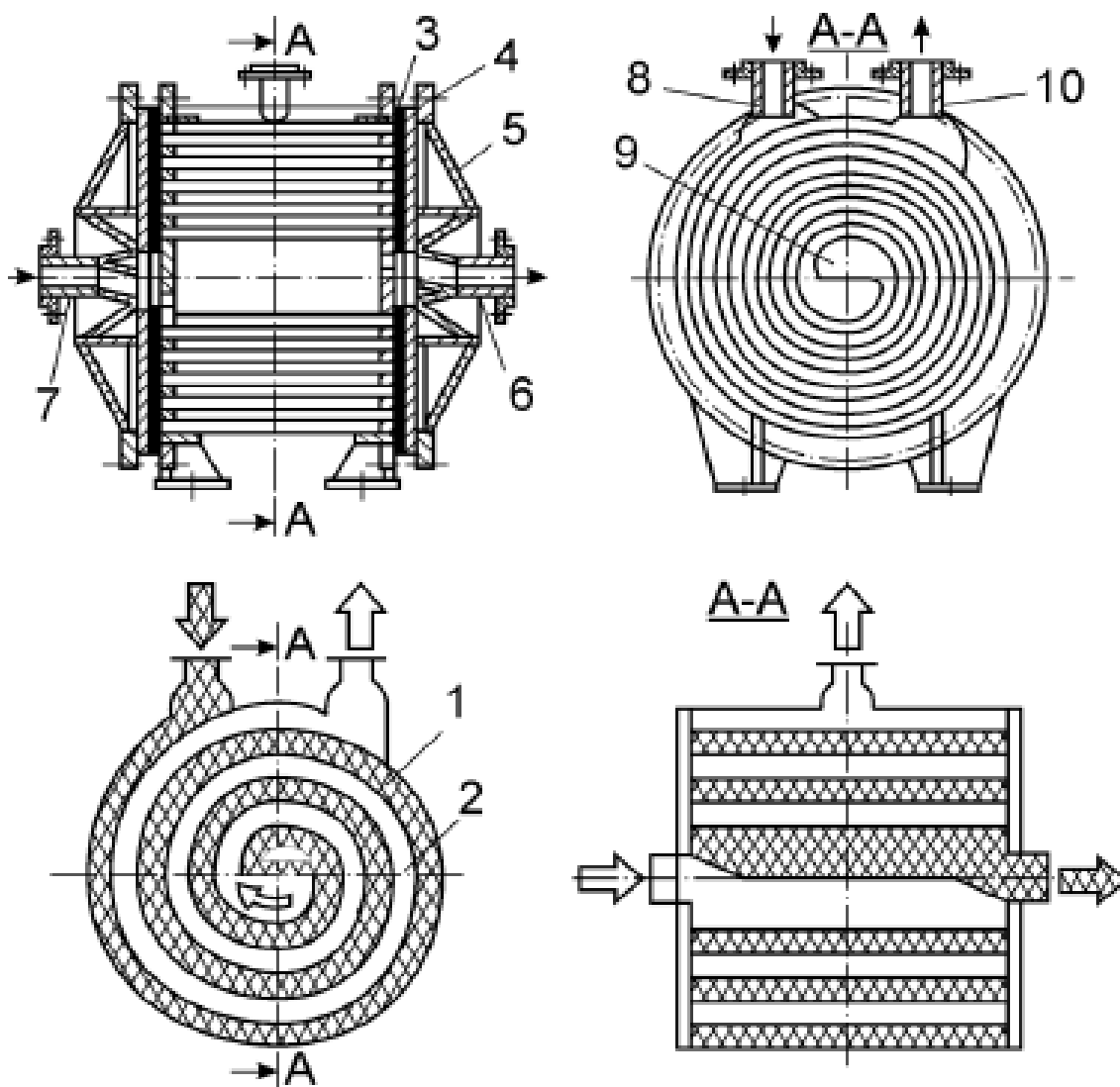
**Рис. 2.12. Схема кожухотрубчатого теплообменника с двойными трубками:**

*1, 3 – трубные решетки; 2 – внутренние трубы; 4 – наружные трубы*

Первый теплоноситель поступает в аппарат сначала во внутреннее пространство маленьких трубок, а затем движется в обратном направлении по кольцевому каналу, второй теплоноситель движется по межтрубному пространству аппарата. Преимуществом данного аппарата является возможность независимого удлинения трубок.

Снизить гидравлическое сопротивление позволит использование спиральных теплообменников. К тому же в спиральных теплообменниках возможна реализация чистого противоточного движения теплоносителей. Спиральные теплообменники выполняются как в горизонтальном, так и в вертикальном исполнении. Одна из конструкций аппарата в горизонтальном исполнении и схема движения потоков приведены на рис. 2.13 [2].

Два листа рулонной стали, образуя канал, закручиваются в спираль и помещаются в корпус. Таким образом, образуется два пространства: для горячего и холодного теплоносителя.



**Рис. 2.13. Спиральный теплообменник:**

1 – каналы для прохода греющей жидкости; 2 – каналы для прохода нагреваемой жидкости; 3 – прокладка; 4 – болтовой зажим; 5 – крышка;  
 6, 8 – патрубки для выхода и входа греющей жидкости;  
 7, 10 – патрубки для входа и выхода нагреваемой жидкости; 9 – камера

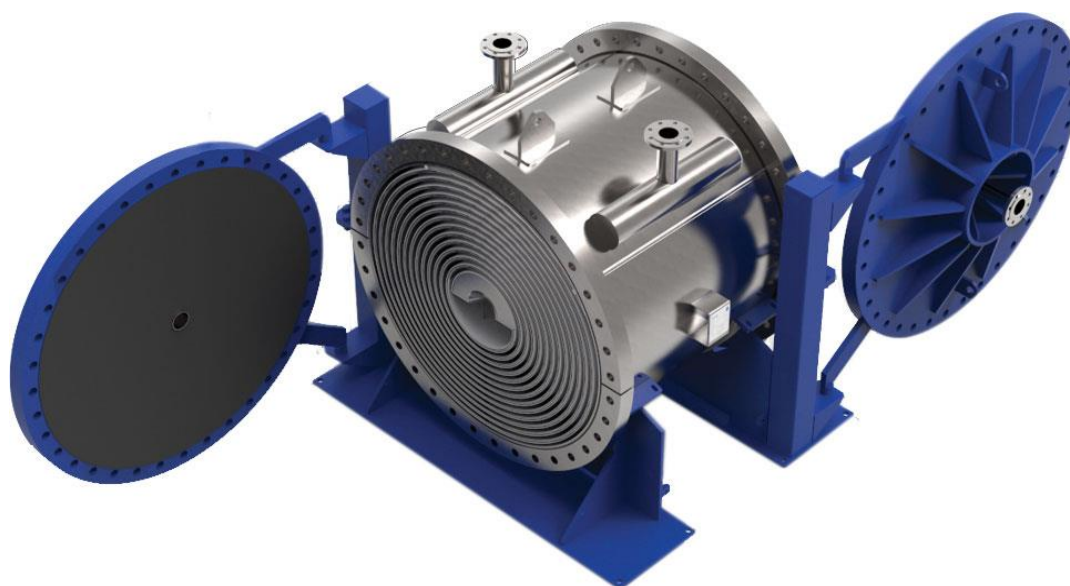
Один из теплоносителей подается в патрубок, расположенный на корпусе, проходит в спиральном канале и выходит через патрубок, расположенный в центре одной из крышек. Другой теплоноситель подается через патрубок, расположенный во второй крышке, и выходит через патрубок, расположенный на корпусе. Навивка спиральных теплообменников производится из стали шириной от 0,2 до 1,5 м, поверхность нагрева аппарата составляет от 3,2 до 100,0 м<sup>2</sup>, ширина

канала 8 или 12 мм, давление до 10 ат. Недостатки спиральных теплообменников:

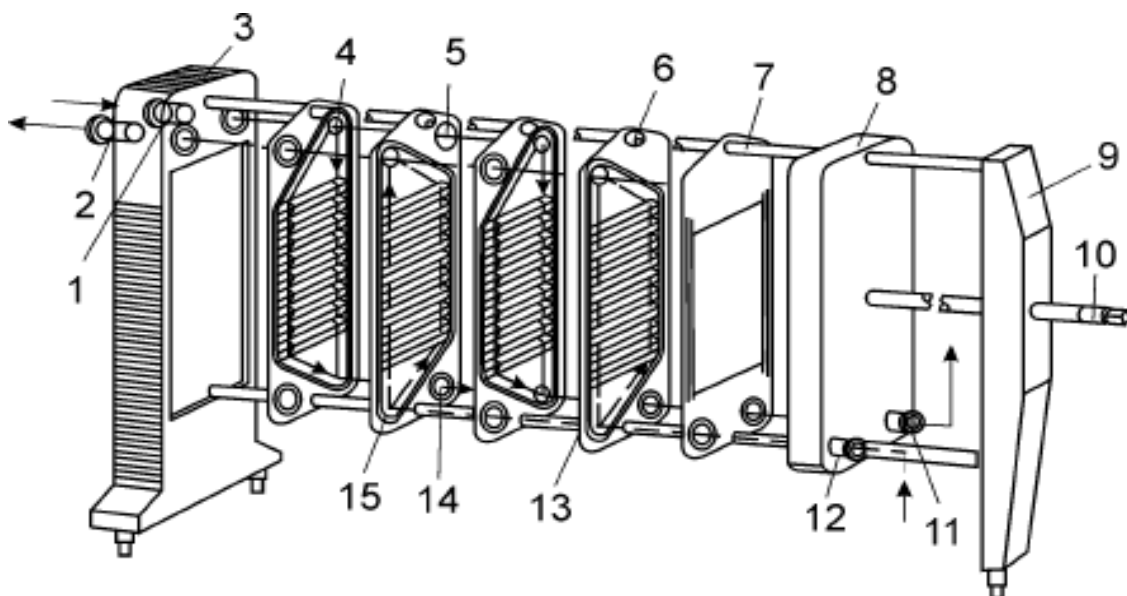
- сложность изготовления;
- трудность обеспечения герметичности;
- ограничения в развиваемой поверхности;
- металлоемкость конструкции.

Надежные и прочные спиральные теплообменники нашли свое применение в нефтегазовой отрасли (рис. 2.14). Отсутствие застойных зон в аппарате и способность к самостоятельной очистке являются причинами использования их для работы с тяжелыми нефтяными осадками.

Исключить ряд недостатков спиральных теплообменников возможно использованием пластинчатых теплообменников. Пластинчатые теплообменники выпускаются в разнообразном исполнении, с различными схемами соединения пластин, формами и типами пластин, способами сборки и т.п. На рисунке 2.15 приведена принципиальная схема сборки пластинчатого аппарата с неподвижной и прижимной плитами.



**Рис. 2.14. Внешний вид спирального теплообменника (спиральный пластинчатый теплообменник Ридан SonSPV ДУ1800)**



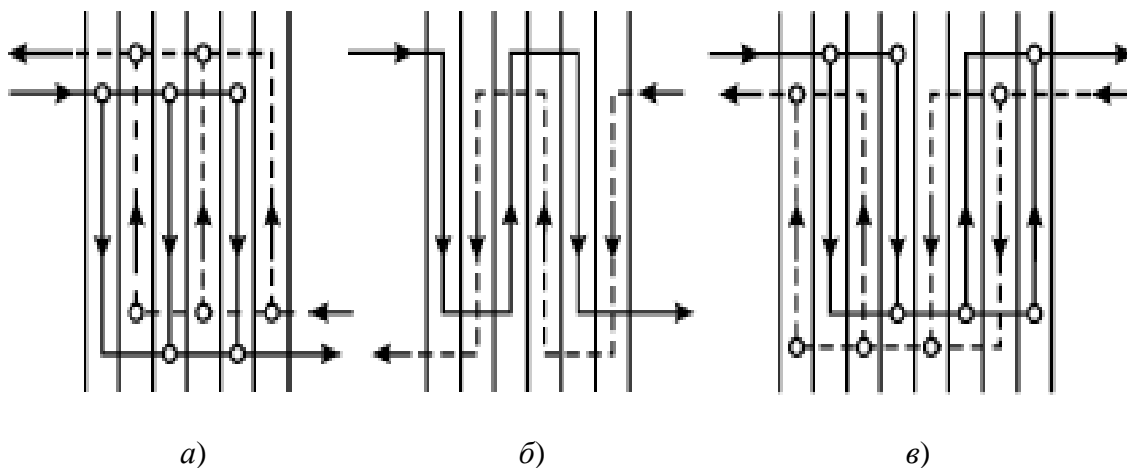
**Рис. 2.15. Принципиальная схема сборки пластинчатого аппарата:**

1, 2, 11, 12 – штуцеры; 3 – неподвижная плита; 4 – верхнее угловое отверстие;  
 5 – кольцевая резиновая прокладка; 6 – граничная пластина; 7 – штанга;  
 8 – нажимная плита; 9 – задняя стойка; 10 – винт; 13 – большая резиновая  
 прокладка; 14 – нижнее угловое отверстие; 15 – теплообменная пластина

Рассмотренный пластинчатый теплообменник представляет собой неподвижную плиту 3 с закрепленными в ней нижней и верхней штангами, между которыми расположены пластины 15. Для герметизации каналов аппарата используются резиновые прокладки 5, 13 и прижимное устройство 8 – 10. В сборе аппарат имеет чередующиеся каналы для горячего и холодного теплоносителей, контактирующих через разделяющую их пластину. Пластинчатые теплообменники предусматривают различные варианты организации движения теплоносителей в зависимости от типа сборки плит: параллельное, последовательное или смешанное (рис. 2.16).

Типы теплообменных пластин и конфигурация гофр, образующих форму каналов для рабочих сред, разнообразны (рис. 2.17, 2.18). Конструкция пластины определяет технические показатели теплообменного аппарата и является его основным элементом. Отличительными особенностями конструкции пластин в целом являются форма

гофр и профиль рабочей теплообменной поверхности, форма угловых отверстий и конфигурация прокладок, способ подвески пластин на раме и фиксация положения пластин в пакете.

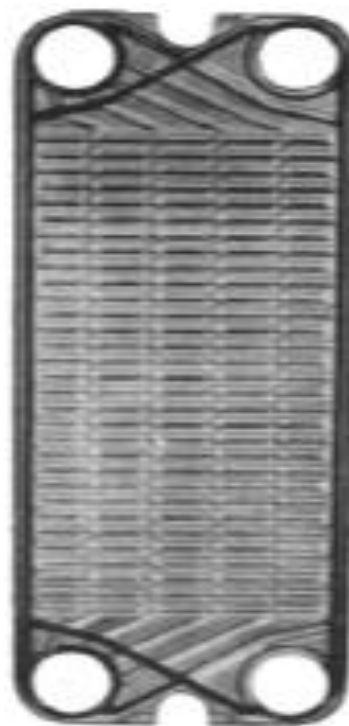


**Рис. 2.16. Схемы соединения пластин:**

*а* – параллельная; *б* – последовательная; *в* – смешанная

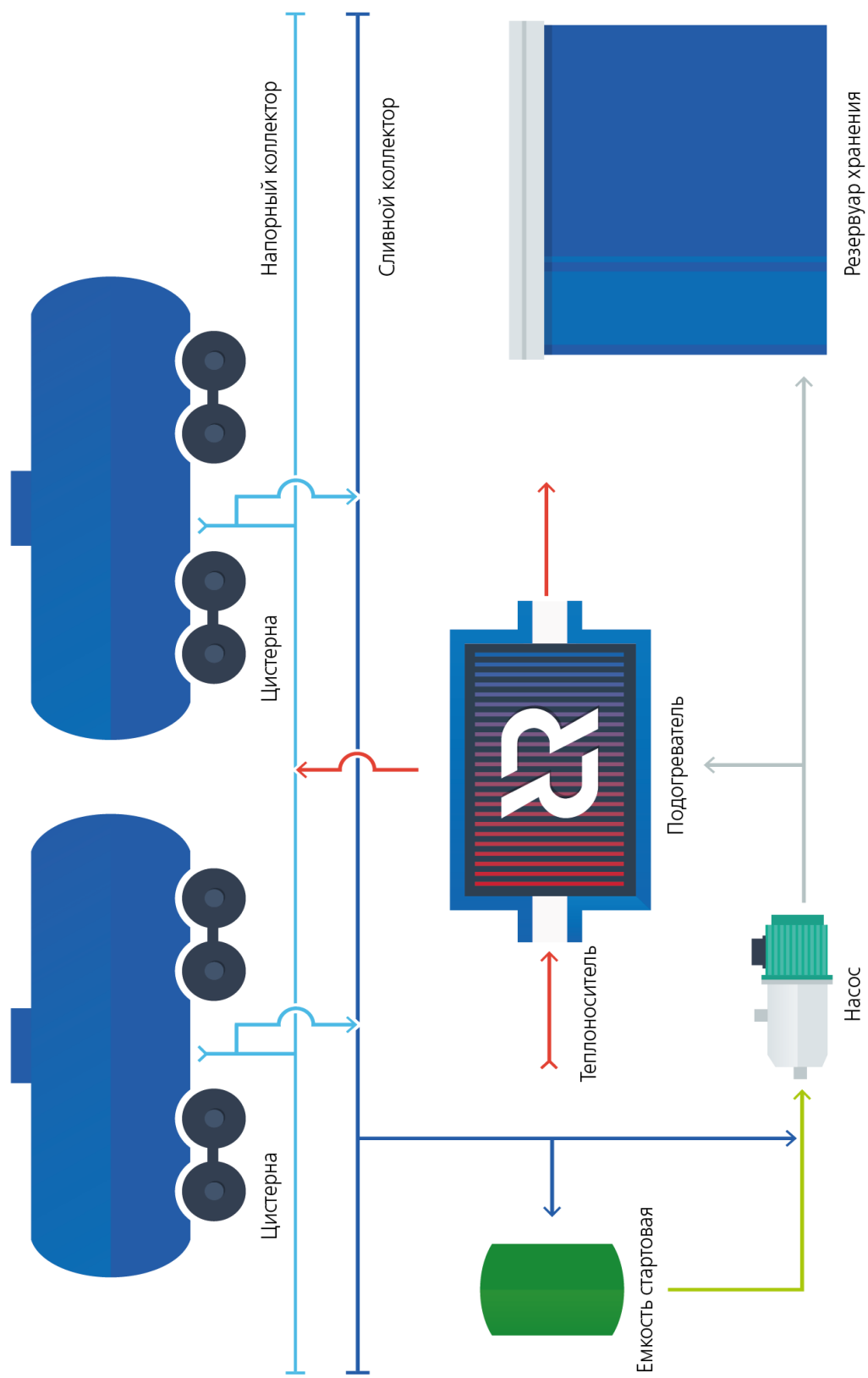


**Рис. 2.17. Пластина с гофрами типа «елочка» и диагональным расположением угловых отверстий («Уралхиммаш»)**



**Рис. 21.18. Пластина с горизонтальными гофрами и прямым расположением угловых отверстий («Альфа-Лаваль»)**





**Рис. 2.19. Схема нижнего слива нефтепродуктов с использованием пластинчатого теплообменника**

Пластинчатые теплообменники удобны для очистки. Применяются для эксплуатации при температурных режимах до 150 °С, что ограничивается главным образом термостойкостью применяемых резиновых прокладок. Давление рабочих сред по обеим сторонам до 15 ат.

В нефтегазовой отрасли пластинчатые теплообменники используются для организации нижнего слива нефти и нефтепродуктов, так как подогретые нефтепродукты полностью сливаются из емкости.

На рисунке 2.19 представлена схема нижнего слива с использованием пластинчатого теплообменника. Теплообменник предназначен для подогрева сливаемого нефтепродукта в напорный коллектор. Использование теплообменников при сливе нефтепродуктов позволяет достичь полного освобождения цистерн от продукта.

## 2.2. ГАЗОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Газовые теплообменники применяются в качестве подогревателей воздуха и предназначены для повышения экономичности работы энергетического оборудования и использования теплоты вторичных энергетических ресурсов различных производств. В котельных агрегатах они используются в качестве воздухоподогревателей. Выходя из топки, топочный газ уносит с собой часть тепла, которое можно вернуть в процесс с помощью организации теплопередачи между горячими топочными газами и холодным воздухом, подаваемым в топку. Применение газового теплообменника в данном случае позволит снизить тепловые потери и улучшить процесс горения:

- использование теплоты может повыситься на 15%;
- коэффициент полезного действия современных котельных агрегатов достигает 92...94%.

Установка воздухоподогревателя (регенератора) является одним из эффективных средств повышения экономичности работы газотурбинных установок (ГТУ), так как регенерация теплоты уходящих

продуктов сгорания снижает количество подводимой теплоты в цикле ГТУ, т.е. уменьшает расход топлива. В качестве примера на рис. 2.20 приведена схема трубчатого регенератора, используемого на газотурбинных установках.

Часто газовые теплообменники используются для рекуперации тепла на стадии сушки готового продукта, так как вместе с отводимым сушильным агентом теряется часть тепла. Например, в целлюлозно-бумажной промышленности газовые теплообменники применяются для утилизации тепла, уносимого паровоздушной смесью в процессе сушки бумаги и картона; в сталеплавильном производстве – в качестве утилизаторов теплоты продуктов сгорания плавильных печей, в химической промышленности – для рекуперации тепла технологических и вентиляционных выбросов.

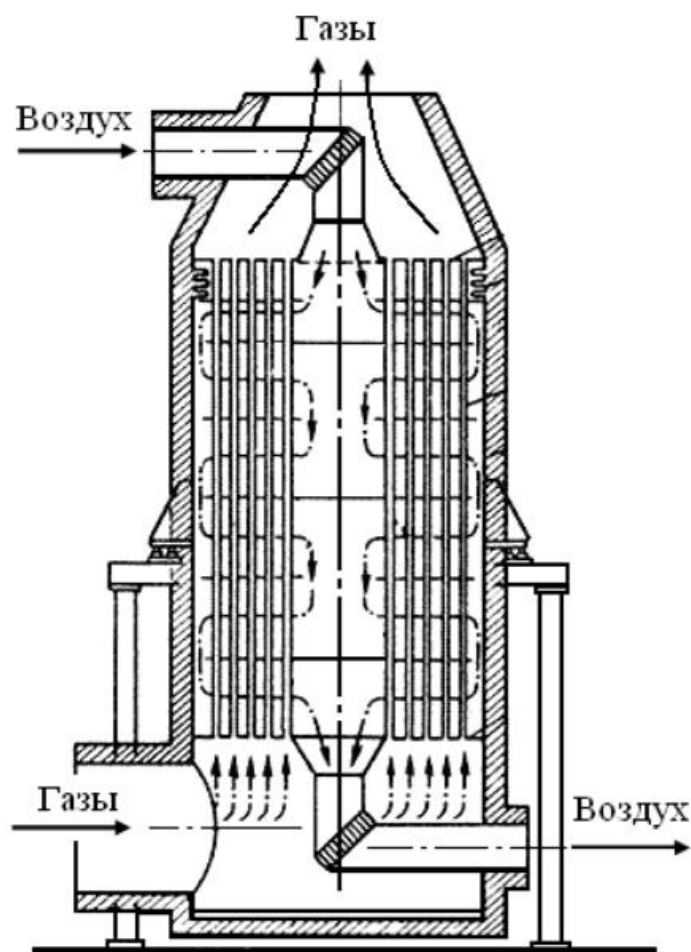
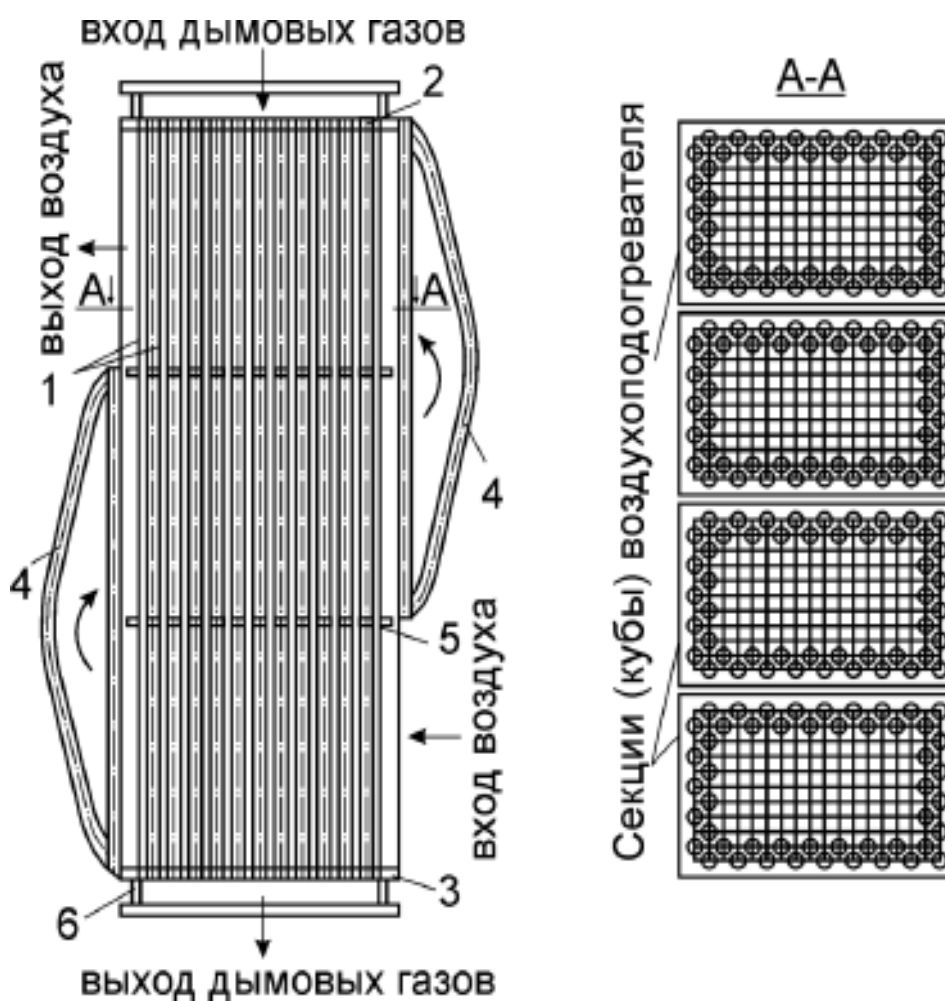


Рис. 2.20. Схема трубчатого регенератора

В котельных агрегатах наиболее широкое распространение получили трубчатые рекуперативные воздухоподогреватели с вертикальным расположением труб (рис. 2.21). Дымовые газы проходят внутри труб, воздух омывает их снаружи поперечным потоком.

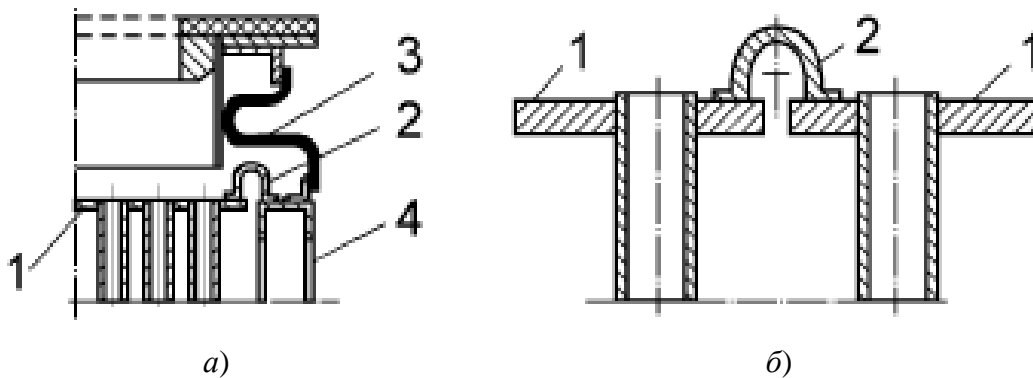
Концы труб привариваются к трубным доскам и располагаются в шахматном порядке. Устранение термических расширений и уплотнение осуществляются линзовыми компенсаторами, представленными на рис. 2.22.

В целях уменьшения высоты воздухоподогревателя применяют двухпоточные и многопоточные схемы подвода воздуха, некоторые из которых приведены на рис. 2.23.



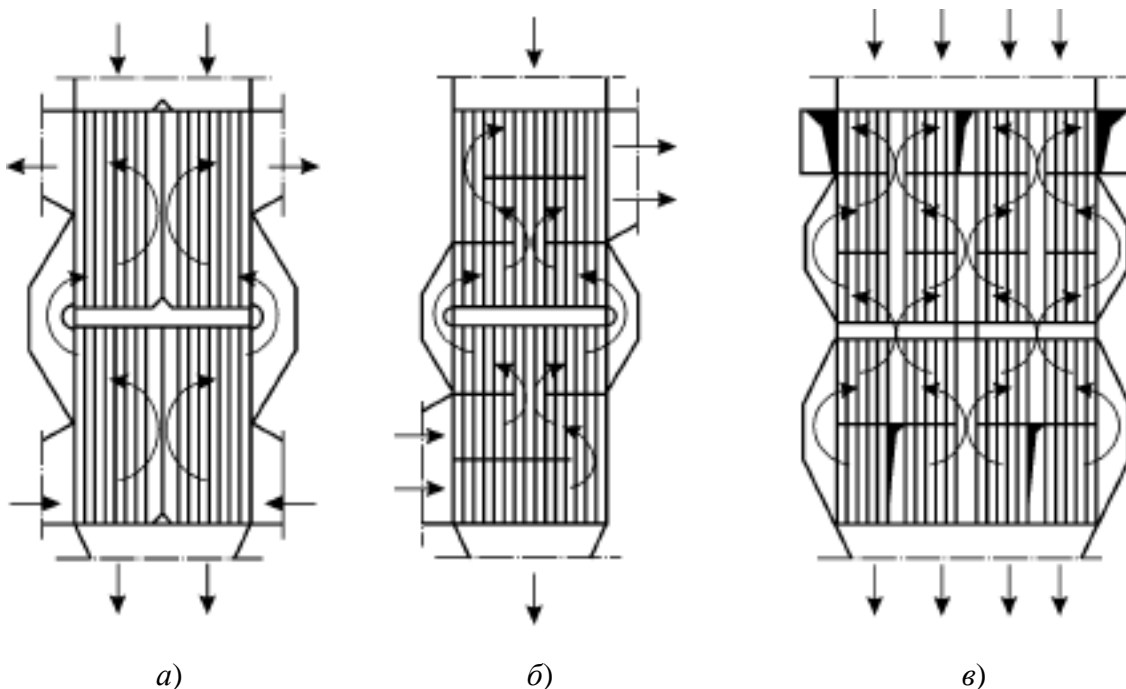
**Рис. 2.21. Трубчатый котельный воздухоподогреватель:**

1 – трубный пучок; 2, 3 – верхняя и нижняя трубные доски;  
4 – перепускные короба; 5 – промежуточные трубные доски; 6 – каркас



**Рис. 2.22. Компенсаторы тепловых расширений:**

*a* – относительно короба воздуха и каркаса; *б* – уплотнение между кубами;  
 1 – трубная доска; 2 – компенсатор расширения труб относительно короба  
 воздуха и между кубами; 3 – компенсатор расширения короба  
 относительно каркаса; 4 – каркас



**Рис. 2.23. Схемы компоновки воздухоподогревателей:**

*a* – двухпоточная по воздуху при двухстороннем его подводе;  
*б* – двухпоточная по воздуху при одностороннем его подводе;  
*в* – многопоточная по воздуху

Трубчатые воздухоподогреватели просты в изготовлении и эксплуатации, но имеют большую массу и занимают большой объем. Для предотвращения низкотемпературной коррозии в опытным порядком

на котлах, сжигающих высокосернистый мазут, устанавливают стеклянный воздухоподогреватель. Стеклянный воздухоподогреватель устанавливается в качестве последней по ходу газов и первой предвключенной по воздуху ступени. Воздух проходит внутри труб, дымовые газы – поперечным потоком в межтрубном пространстве («обращенного» типа). По концам трубы закреплены с помощью трубных досок и кольцевого уплотнения из жаростойкой резины. При этом устанавливаются две трубные доски: основная и прижимная. Первый по ходу газов ряд выполнен из стальных труб для защиты стеклянных труб от механических повреждений. Основные трубные доски скреплены металлическими стяжками. Одним из путей усовершенствования recuperативных котельных воздухоподогревателей является использование профильно-пластинчатых поверхностей нагрева. В качестве одной из форм поверхности нагрева пластинчатого воздухоподогревателя рекомендуются профильные листы с овалообразными выступами. Для перекрестной схемы движения теплоносителей при сборке листов в пакет образуются щелевые волнообразные каналы для прохода воздуха и прямые двухугольные каналы для дымовых газов. Компоновка двухходового двухпоточного пластинчатого воздухоподогревателя представлена на рис. 2.24.

Профилирование листов производится на прессе с помощью специального штампа. Форма профильного листа противоточного типа приведена на рис. 2.25. Лист состоит из входного, выходного и противоточного участков. При сборке листов в пакет во входных и выходных участках образуются волнообразные каналы для прохода воздуха, в противоточной части воздух и продукты сгорания движутся по двухугольным каналам, образованным овалообразными выступами с симметричным двухсторонним расположением.

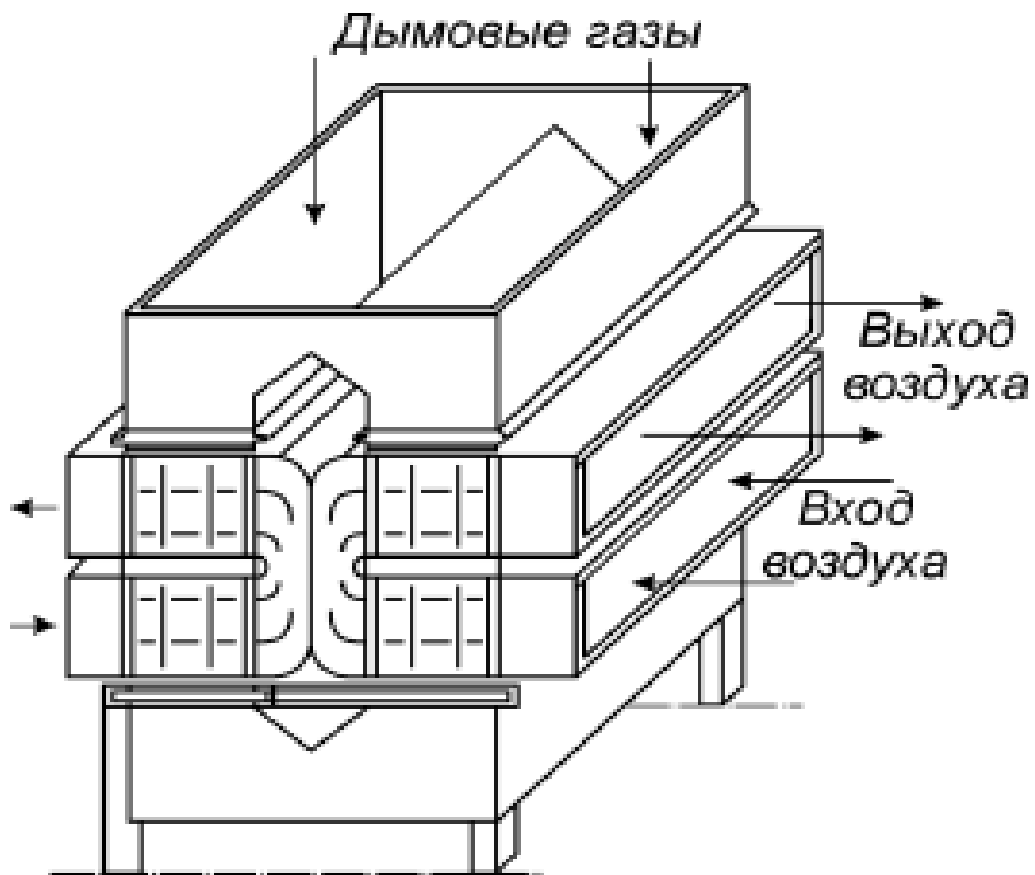


Рис. 2.24. Схема пластинчатого воздухоподогревателя

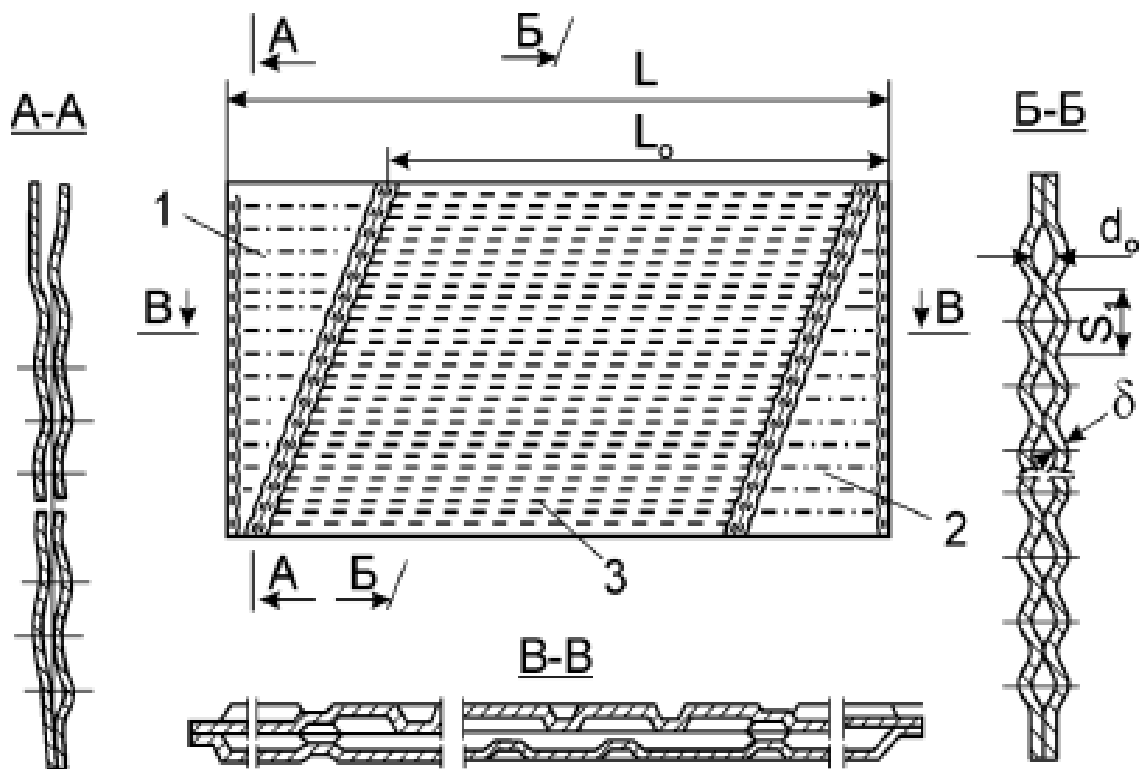


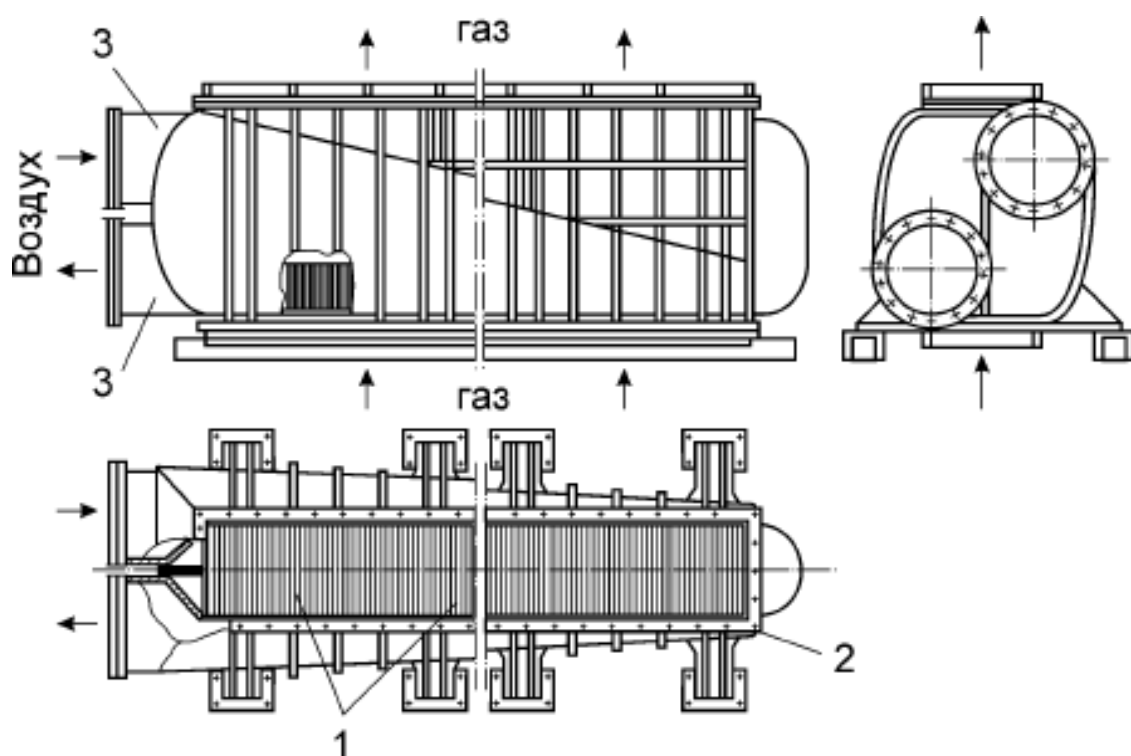
Рис. 2.25. Профильный лист противоточного типа:

1, 2 – входной и выходной участки; 3 – противоточный участок

На рисунке 2.26 приведена конструкция секции горизонтального пластинчатого воздухоподогревателя газотурбинной установки. Воздухоподогреватель выполнен двухсекционным. Каждая секция состоит из трех пакетов, заключенных в общий корпус, который одновременно служит газоходом. Это обеспечивает равномерную раздачу воздуха во все элементы. По сравнению с трубчатыми аппаратами, пластинчатый характеризуется утечками воздуха при эксплуатации, что негативно сказывается на эффективности работы и объясняет небольшую распространенность таких аппаратов.

Для утилизации теплоты паровоздушной смеси в целлюлозно-бумажном производстве применяются в основном гладкопластинчатые и трубчатые теплоуловители.

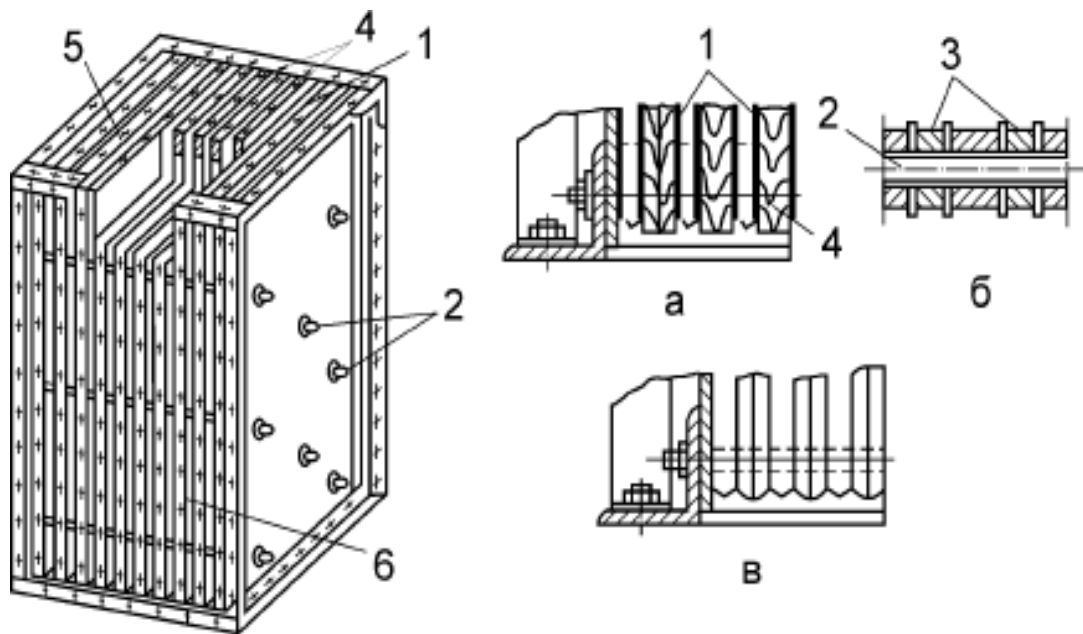
Секция гладкопластинчатого теплоуловителя представлена на рис. 2.27.



**Рис. 2.26. Секция воздухоподогревателя газотурбинной установки:**

*1* – пакеты; *2* – корпус (газоход); *3* – воздушные коллекторы





**Рис. 27. Секция гладкопластинчатого теплоуловителя:**

- а* – соединение листов с помощью планок; *б* – дистанционирование листов;  
*в* – соединение листов без планок; 1 – листы; 2 – стяжные болты;  
 3 – дистанционные втулки; 4 – планки; 5 – вертикальные каналы;  
 6 – горизонтальные каналы

Аппарат выполнен из алюминиевых листов с щелевыми каналами шириной 18...20 мм. По вертикальным каналам движется горячий теплоноситель (пар), по горизонтальным – холодный (воздух). Аппарат имеет низкую тепловую эффективность и компактность. Соединительные элементы не обеспечивают плотного соединения, что приводит к переходу одной рабочей среды в другую.

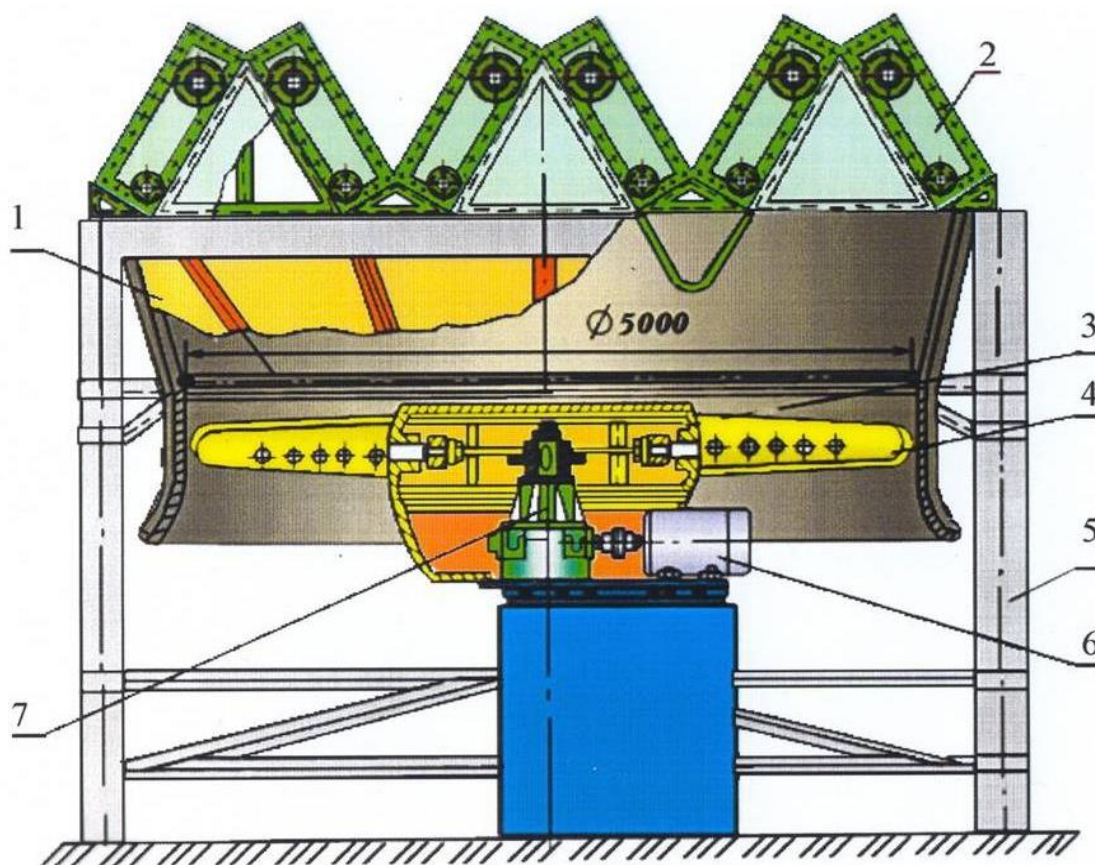
Трубчатые теплоуловители менее подвержены утечкам газовых сред и выполняются из алюминиевых труб с шахматным или коридорным расположением. Горячий теплоноситель (паровоздушная смесь) проходит внутри труб, холодный теплоноситель (воздух) омывает трубы по внешней стенке.

В нефтегазовой промышленности нашли широкое применение аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. В процессе транспортировки природный газ нагревается и возникает необходимость в его

охлаждения. Самым доступным теплоносителем в данном случае является воздух, из-за чего для охлаждения используются газовые теплообменники, в данном случае – аппараты воздушного охлаждения. Схема аппарата представлена на рис. 2.28.

Охлаждаемый газ подается в теплообменные секции, расположенные в верхней части аппарата. Снизу вентилятором через диффузор подается охлаждающий воздух. Процесс теплообмена осуществляется в змеевиковом теплообменнике. Для интенсификации процесса на трубах выполнено оребрение на внешней поверхности.

Лопастей диффузора могут менять свое положение в зависимости от погодных условий и температуры окружающего воздуха.



**Рис. 2.28. Схема аппарата воздушного охлаждения газа:**

- 1 – диффузор; 2 – теплообменные секции; 3 – коллектор вентилятора;  
4 – вентилятор; 5 – несущая металлоконструкция;  
6 – электродвигатель; 7 – редуктор

### 2.3. ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

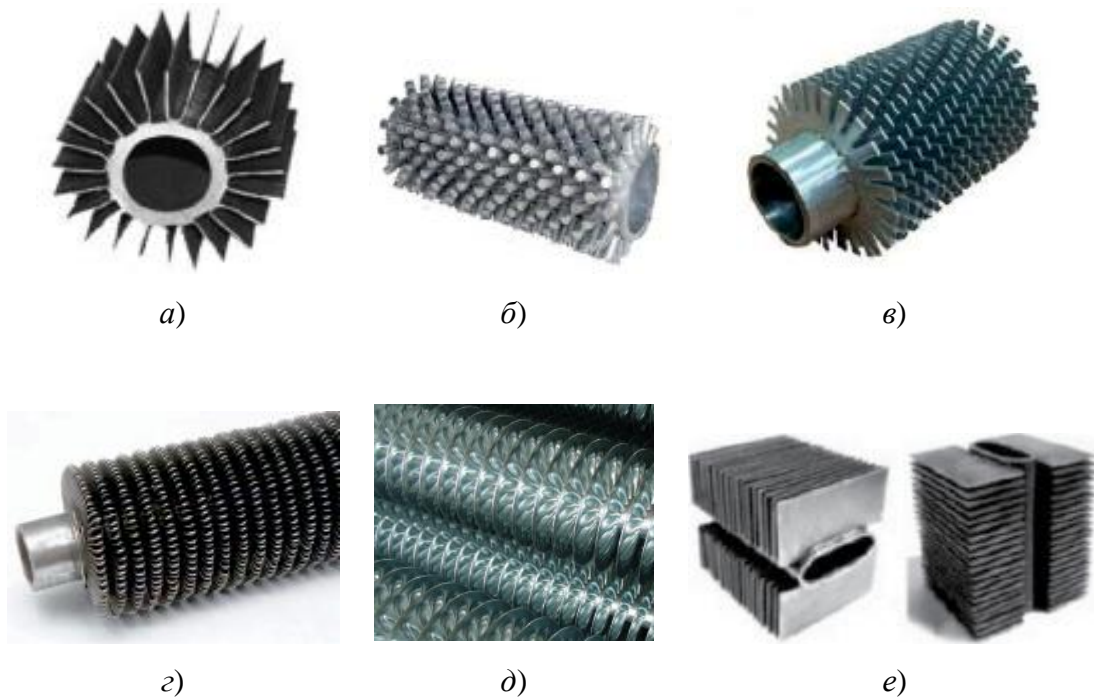
В производственных процессах иногда возникает необходимость подвода или отвода тепла от газовой фазы. Повысить интенсификацию процесса теплопередачи возможно с помощью второго теплоносителя – жидкости, так как жидкости характеризуются большими, чем газы, значениями коэффициента теплоотдачи. Рассматриваемый процесс осуществляется в газожидкостном теплообменнике. По характеру протекающего процесса газожидкостные рекуперативные теплообменники можно разделить на следующие группы:

- для конденсации пара из газовой среды либо охлаждения газа. Тепло переходит от газового теплоносителя к жидкому (жидкость нагревается);
- для испарения жидкости в газовой среде либо нагрева газа. Тепло переходит от жидкого теплоносителя к газовому (жидкость охлаждается).

Основной конструктивной сложностью газожидкостных теплообменников является необходимость создания разной по площади поверхности контакта теплоносителей с разных сторон разделительной поверхности. Так как газовая фаза характеризуется невысокими значениями коэффициентов теплоотдачи, по сравнению с жидкой фазой, то поверхность контакта со стороны газовой фазы должна быть значительно больше, чем со стороны жидкой фазы. Одним из вариантов решения поставленной задачи является оребрение теплоотдающей поверхности. В зависимости от расположения оребрения оно может быть выполнено внешним или внутренним (рис. 2.29), в зависимости от вида оребрения (рис. 2.30) оно может быть с наружным проволочным петельным оребрением, с накатными поперечными ребрами, с продольным оребрением. Применение оребрения позволяет в 1,6–1,9 раза увеличить компактность аппарата гладких труб, уменьшить примерно на 20% затраты труб и снизить примерно на 40% расход металла на корпус аппарата.



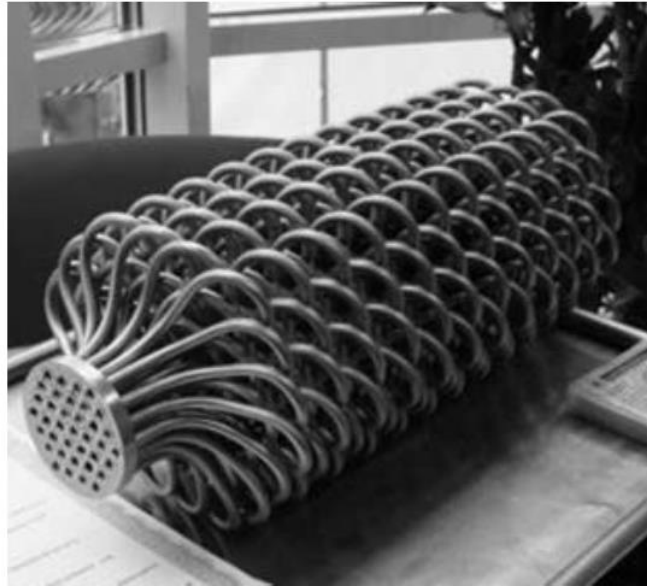
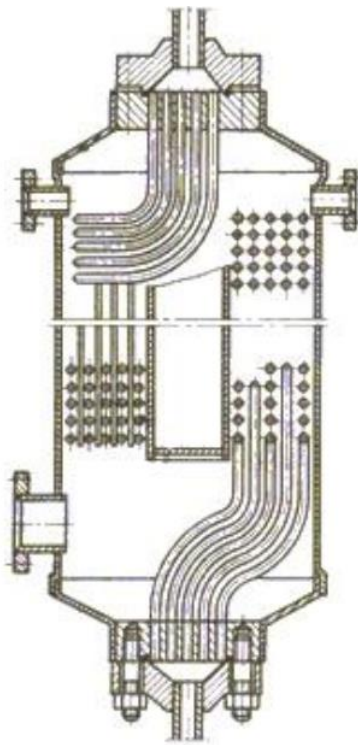
**Рис. 2.29. Общий вид труб с внутренним оребрением**



**Рис. 2.30. Трубы с оребрением:**

*a* – продольно – оребренная труба; *б* – ошипованные трубы;  
*в* – оребрение просечной лентой; *г* – проволочное оребрение;  
*д* – спиральное оребрение; *е* – неполное поперечное оребрение  
 плоскоовальных труб

Для разделения газовых смесей глубоким охлаждением используются витые теплообменники. Схема и общий вид витого теплообменника представлены на рис. 2.31.



**Рис. 2.31. Витой рекуперативный теплообменник**

Основными достоинствами витого теплообменника являются его температурная самокомпенсация и возможность работы при высоких давлениях.

Конструктивные особенности пластинчатых теплообменников для использования их в системе газ–жидкость заключаются в использовании асимметричных пластин с ячеистой формой каналов (рис. 2.32), что позволяет организовать различные гидродинамические режимы движения теплоносителей по разные стороны пластин при низком перепаде давления.

Достоинствами пластинчатых теплообменников с асимметричными пластинами являются легкость и компактность аппарата и обеспечение высокого коэффициента теплопередачи.

Газожидкостные теплообменники используются для охлаждения выхлопных газов, на теплоэлектростанциях в системах конденсации, в безмаслянных компрессорах, автономных охладителях воздуха, адсорбционных осушителях, в качестве охладителей надувочного воздуха в системах утилизации тепла.



**Рис. 2.32. Пластинчатый теплообменник для системы газ–жидкость**

#### **2.4. ПАРОЖИДКОСТНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ**

В различных отраслях промышленности для обеспечения технологических процессов производства необходимо осуществление процесса теплопередачи между конденсирующимся паром и испаряющейся жидкостью. Такие процессы используются в выпарных установках, испарителях, расширителях непрерывной и периодической продувки. Для осуществления этих процессов используются парожидкостные рекуперативные или смесительные теплообменники. Смесительные теплообменники наиболее широко используются для конденсации водяного пара холодной водой в барометрических конденсаторах выпарных установок.

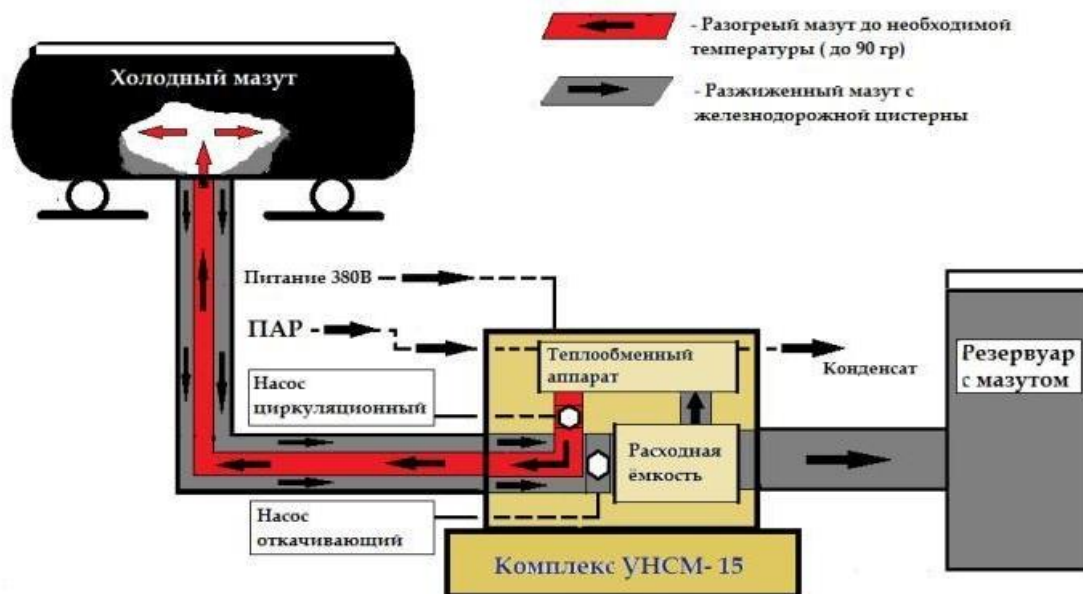


Рис. 2.33. Схема установки нижнего слива мазута

Большую группу аппаратов составляют теплообменники, в которых реализуется процесс передачи теплоты при кипении различных жидкостей с получением вторичного пара.

В нефтегазовой отрасли широко используются парожидкостные теплообменники. Так, для осуществления нижнего слива нефтепродуктов из цистерны используется схема, представленная на рис. 2.33.

Разогреве мазута до  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  интенсифицирует процесс слива и позволяет полностью слить весь продукт. Невысокие температуры позволяют использовать в качестве горячего теплоносителя водяной пар. Для осуществления процесса теплопередачи в данном случае чаще всего используется пластинчатый теплообменник.

### 3. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

---

Для повышения эффективности технологических систем, работающих в интервале перепадов температуры до нескольких сотен Кельвин между теплоносителями, часто оказывается целесообразным применение регенеративных теплообменных аппаратов. Регенеративный теплообменный аппарат – устройство, в котором передача теплоты от одного теплоносителя к другому происходит с помощью теплоаккумулирующих элементов (насадок). Теплоаккумулирующие элементы омываются потоками горячего и холодного теплоносителей с определенной периодичностью. В течение периода нагрева насадки (первый период) через теплообменник пропускают горячий теплоноситель. В течение периода охлаждения насадки (второй период) через аппарат пропускают холодный теплоноситель, который нагревается от теплоаккумулирующих элементов. Периоды нагревания и охлаждения насадки могут составлять от нескольких минут до нескольких часов.

При правильной организации переноса тепловой энергии по системе каналов финансовые затраты минимальны, а производительность оптимальна. Улучшенным вариантом такой системы является регенеративный теплообменник, позволяющий выполнять попеременный нагрев или охлаждение эксплуатационной среды.

Современные теплообменники сконструированы таким образом, что позволяют проводить процессы переноса тепловой энергии между взаимодействующими средами с минимальными потерями. Взаимодействие чаще всего происходит между горячим теплоносителем и холодными металлическими поверхностями, которые затем передают



теплоту другой циркулирующей среде. Кроме теплообмена между холодными и горячими средами, теплообменные аппараты применяются в процессах выпаривания, сушки, плавления и конденсации. В качестве источника тепла могут использоваться как горячие, так и холодные теплоносители, что важно для производственных процессов с периодическим охлаждением оборудования.

Основное предназначение теплообменника выполняется в момент соприкосновения теплоносителя со стенкой аппарата, разделяющей контактирующие потоки. Принцип действия теплообменника – это аккумуляция энергии от теплоносителя, у которого температура отличается от температуры разделяющей стенки аппарата. Таким образом, процесс передачи тепла можно разделить на процесс переноса тепла от первого теплоносителя к промежуточному телу и процесс переноса тепла от тела ко второму теплоносителю и осуществлять их в разных аппаратах. Накопительный принцип работы теплообменника с разделением на среды по температурному признаку имеет существенные преимущества. Во-первых, улучшается качество состава потоков из-за отсутствия потребности в подаче теплоносителей в один аппарат. Во-вторых, повышается эффективность передачи тепла из-за увеличения поверхности контакта фаз. Регенеративные модели теплообменников могут применяться для различных рабочих сред. Разные теплоносители используются в производственных операциях. Например, для обогрева и охлаждения используются водяные пары, газовые смеси, дым и топочные продукты сгорания. Но один и тот же регенеративный теплообменник не может поддерживать работу с разными теплоносителями. В принципе конструкция аппарата подразумевает такую теоретическую возможность, но каждый теплообменник рассчитывается на эксплуатацию во взаимодействии с определенной средой, применяемые температуры и среда отрицательно влияют на структуру материала, из которого изготовлен аппарат.

Температурный уровень теплоносителей определяют конструкцию и область применения регенеративных теплообменных аппаратов и установок. Выделяют аппараты, работающие в областях:

- высоких (600...1000 °С);
- средних (0...600 °С);
- низких (–100...0 °С);
- очень низких температур (–270...–100 °С).

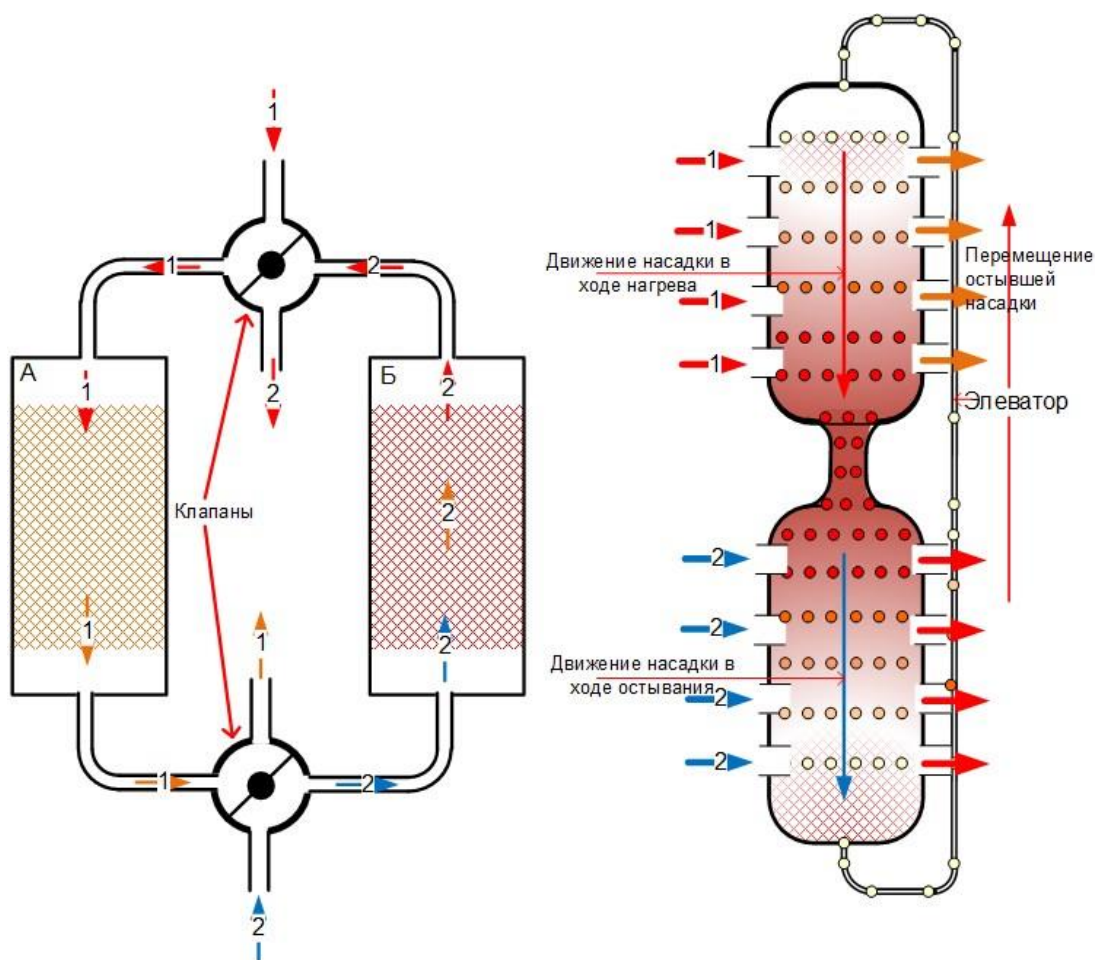
Теплообменные регенераторы и установки применяют для подогрева газообразных компонентов горения, газотурбинных установок, воздухоразделительных установок, низкотемпературных установок и т.д.

По типу нахождения насадки в аппарате различают регенеративные с теплообменные аппараты:

- с неподвижной насадкой (рис. 3.1, *а*);
- с подвижной насадкой (рис. 3.1, *б*).

Теплообменники непрерывного действия представляют собой установки с зернистым циркулирующим наполнителем. Система управления процессом перемещения рабочей среды допускает полную остановку движения, при которой теплоноситель сохраняет контакт с наполнителем. Функцию естественного автоматического регулятора могут выполнять насадки, аккумулирующие тепло. В конструкции регенеративного теплообменника с неподвижными насадками возможности контроля потоков ограничены и полностью зависят от настроек, выставленных оператором.

Модели периодического действия обладают усложненной структурой распределения камер с теплоносителями. Эти устройства повышают эффективность работы аппарата, но также требуют более ответственной функции силового обеспечения со стороны циркуляционного насоса.



**Рис. 3.1. Схема работы регенеративных теплообменников:**

*а* – с неподвижной насадкой; *б* – с подвижной насадкой

Для осуществления непрерывного процесса теплопередачи от одного теплоносителя к другому необходимы два слоя насадки: первый слой насадки контактирует с горячим теплоносителем, забирает тепло и нагревается, второй слой насадки контактирует с холодным теплоносителем, отдает ему тепло и охлаждается. При достижении насадками требуемой температуры аппараты переключаются, и процесс теплопередачи протекает в обратном направлении. В производстве осуществляется автоматическое переключение регенераторов через определенные промежутки времени.

Насадка – главный элемент регенеративного теплообменника, определяющий эффективность их работы. Условия проведения процесса, температурный интервал, свойства теплоносителей определяют

выбор того или иного теплоносителя. В настоящее время существует большой выбор вида, размера и материала насадок (рис. 3.2). В аппаратах с неподвижной насадкой используются:

- диски из алюминиевой гофрированной ленты;
- сетчатая насадка;
- насадка из пластин с каналами переменного сечения;
- шаровая насадка;
- кирпичная насадка;
- кольца.

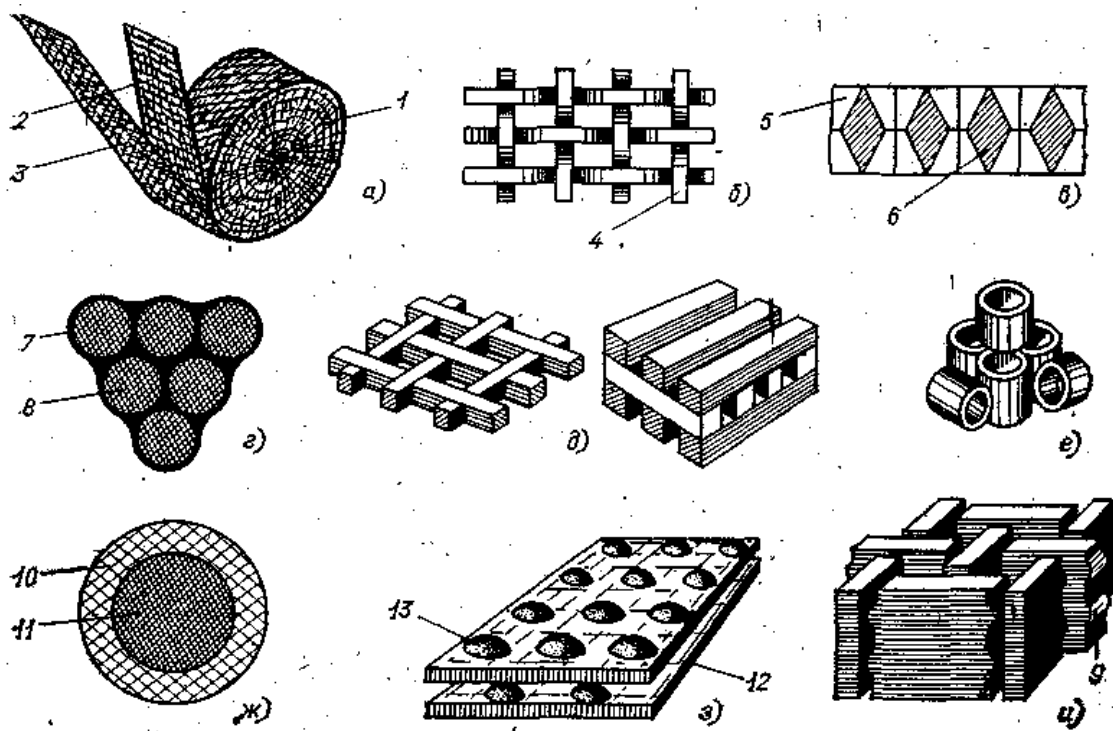
В регенераторах воздуходелительных установок и холодильно-газовых машинах применяют:

- диски из алюминиевой гофрированной ленты;
- нерегулярная насадка из базальта или кварцита в виде гранул диаметром 4...14 мм
- сетчатая насадка из материалов с высокой теплопроводностью (медь, латунь, бронза).

При организации процесса теплопередачи в средах с высокими температурами применяют насадки из огнеупорных кирпичей с выступами различной формы.

Насадку для аппарата с неподвижным, псевдокипящим («кипящим») или падающим слоем выполняют из колец Рашига, крошки или шариков размером 6...12 мм из каолина, оксидов алюминия, магния, циркония и т.п. Насадки должны обладать высокой удельной теплоемкостью, быть жаро- и химически стойкими, не трескаться при резких изменениях температуры, не испаряться, не истираться и выдерживать ударную нагрузку.

При контакте насадки в режиме кипящего слоя с горячим потоком происходит нагревание покрытия *10*, а ядро *11* гранул начинает плавиться.



**Рис. 3.2. Некоторые типы насадок:**

- а* – диски из алюминиевой гофрированной ленты; *б* – сетчатая насадка;
- в* – насадка из пластин с сужающе-расширяющимися каналами;
- г* – шаровая насадка; *д* – кирпичная насадка; *е* – кольца Рашига; *ж* – гранула;
- з* – пакет пластин; *и* – кирпичная насадка с выступами; *1* – диск; *2* – лента;
- 3* – гофры; *4* – металлическая проволока; *5* – металлическая пластина;
- 6* – усеченная пирамида; *7* – металлические шары; *8* – поры, заполненные инертным газом; *9* – выступы; *10* – металлическое покрытие; *11* – ядро;
- 12* – пакет пластин; *13* – двусторонние выпуклости

При этом от газового горячего потока отбирается дополнительное количество теплоты, равное скрытой теплоте плавления материала ядра. После перемещения гранул во вторую часть аппарата с холодным газом последний нагревается, а гранулы охлаждаются. При этом происходит затвердевание их ядра, что ведет к выделению скрытой теплоты плавления материала ядра. Таким образом, теплоаккумулирующая способность насадки складывается из теплоемкости ядра, теплоемкости покрытия, а также из скрытой теплоты плавления материала ядра.

Температурная область используемых теплоносителей определяет группы конструкций теплообменных аппаратов: работающих в областях высоких, средних и низких температур. В металлургической и стеклоплавильной промышленности применяют регенераторы с неподвижной насадкой из огнеупорных кирпичей. Воздухонагреватели доменных печей имеют очень большие размеры. Два или несколько совместно работающих таких воздухонагревателей имеют высоту до 50 м и диаметр до 11 м, они могут нагревать до 1300 °С примерно 500 000 м<sup>3</sup>/ч воздуха. На рисунке 3.3 представлены внешний вид и продольный разрез доменной печи с регенератором и кирпичной насадкой.

В камере сгорания сжигают газообразное топливо. Продукты сгорания поступают в воздухонагреватель сверху и, двигаясь вниз, нагревают насадку, а сами при этом охлаждаются и выходят внизу. После переключения шибера воздух движется снизу-вверх через насадку в обратном направлении и при этом нагревается. Другим примером высокотемпературного регенератора является воздухонагреватель сталеплавильной печи (рис. 3.4). Газообразное (жидкое) топливо и воздух перед подачей в печь нагреваются за счет теплоты продуктов сгорания.

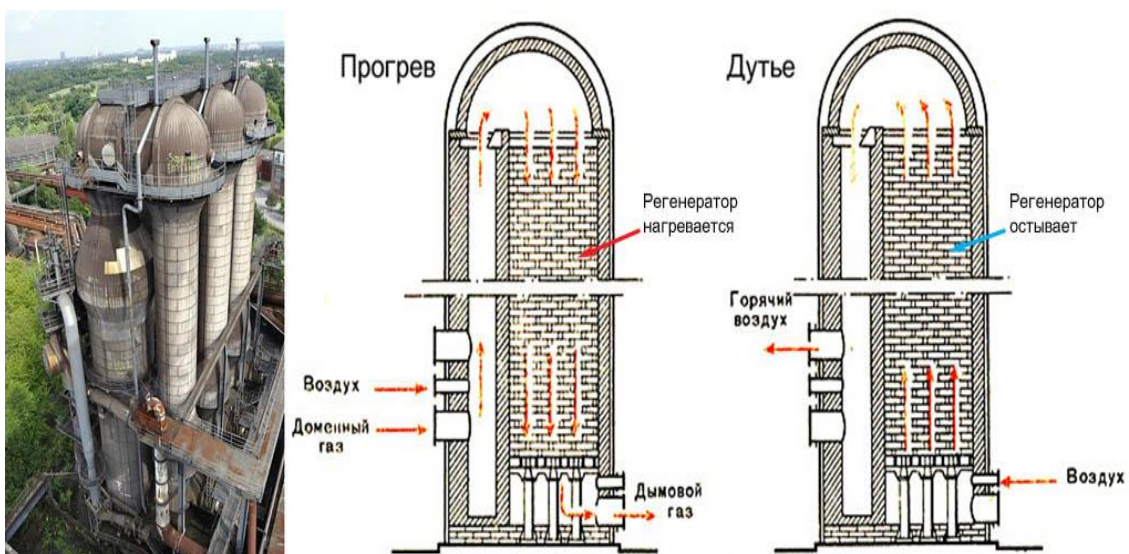


Рис. 3.3. Внешний вид и принцип работы доменной печи



**Рис. 3.4. Схема сталеплавильной печи с регенератором**

Для среднетемпературных процессов в технике используют воздухонагреватели непрерывного действия с вращающимся ротором системы «Юнгстрем» (рис. 3.5). Регенеративные вращающиеся подогреватели (РВП) применяют на электростанциях в качестве воздухонагревателей, использующих теплоту дымовых газов, выходящих из котлов. Плоские или гофрированные металлические листы, прикрепленные к валу, используют в качестве насадки. Насадка в виде ротора медленно вращается в вертикальной или горизонтальной плоскости с частотой 3...6 об/мин. Корпус разделен на части секторными плитами, в одни части подается горячий газ, в другие – воздух. Аппарат работает в непрерывном режиме. К недостаткам конструкции следует отнести переток воздуха в горячую среду и значительные тепловые потери.

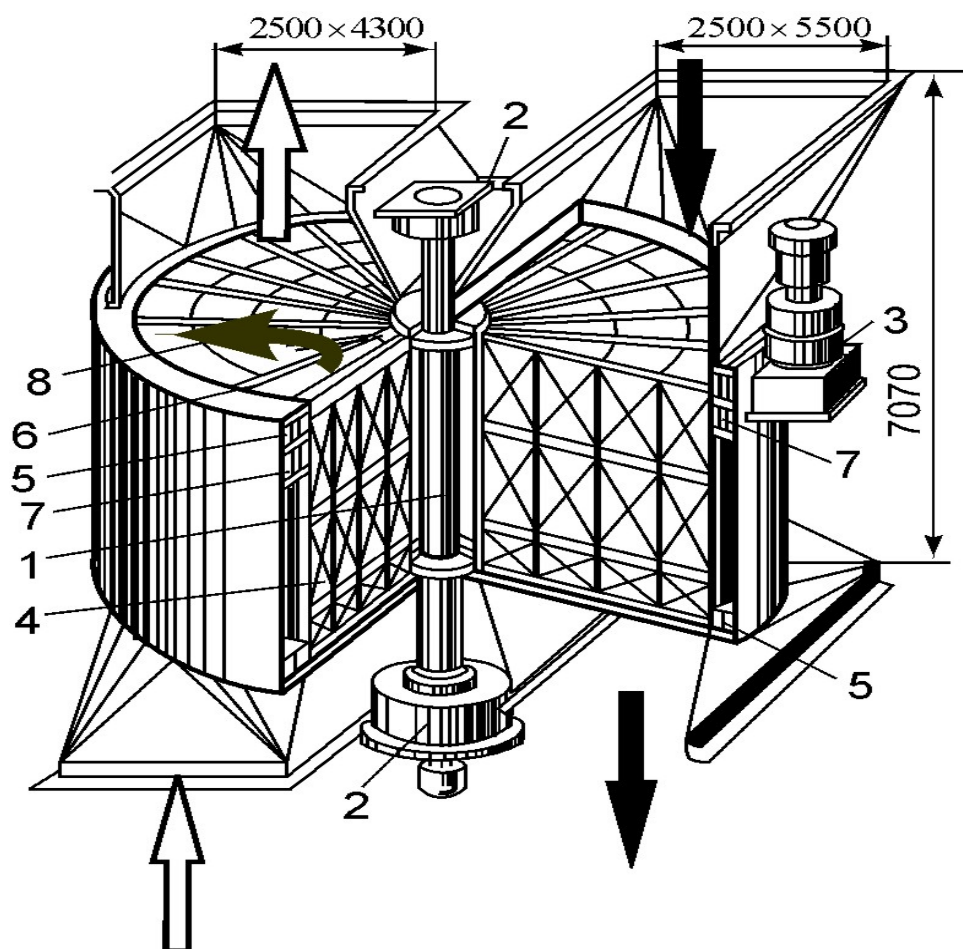
Подведя итог по анализу регенеративных вращающихся подогревателей, следует отметить их достоинства:

- непрерывный режим работы;
- постоянная средняя температура нагреваемого воздуха;
- компактность;

и недостатки:

- дополнительный расход электроэнергии;
  - сложность конструкции;
  - невозможность герметичного отделения полости нагрева от полости охлаждения.
- от полости охлаждения.

В настоящее время в различных отраслях промышленности, когда термостойкость высоколегированных сталей недостаточна, получили применение теплообменники с неподвижным, кипящим или падающим слоем из жаростойкого твердого сыпучего теплоносителя. В таких теплообменниках перегревают пары воды и органических жидкостей, нагревают воздух и газы до 2000 °С.



**Рис. 3.5. Схема воздухонагревателя непрерывного действия с вращающимся ротором системы «Юнгстрем»:**

- 1 – вал ротора; 2 – подшипники; 3 – электродвигатель;  
 4 – набивки; 5 – наружный кожух; 6, 7 – радиальное и периферийное уплотнения;  
 8 – утечка воздуха через уплотнения



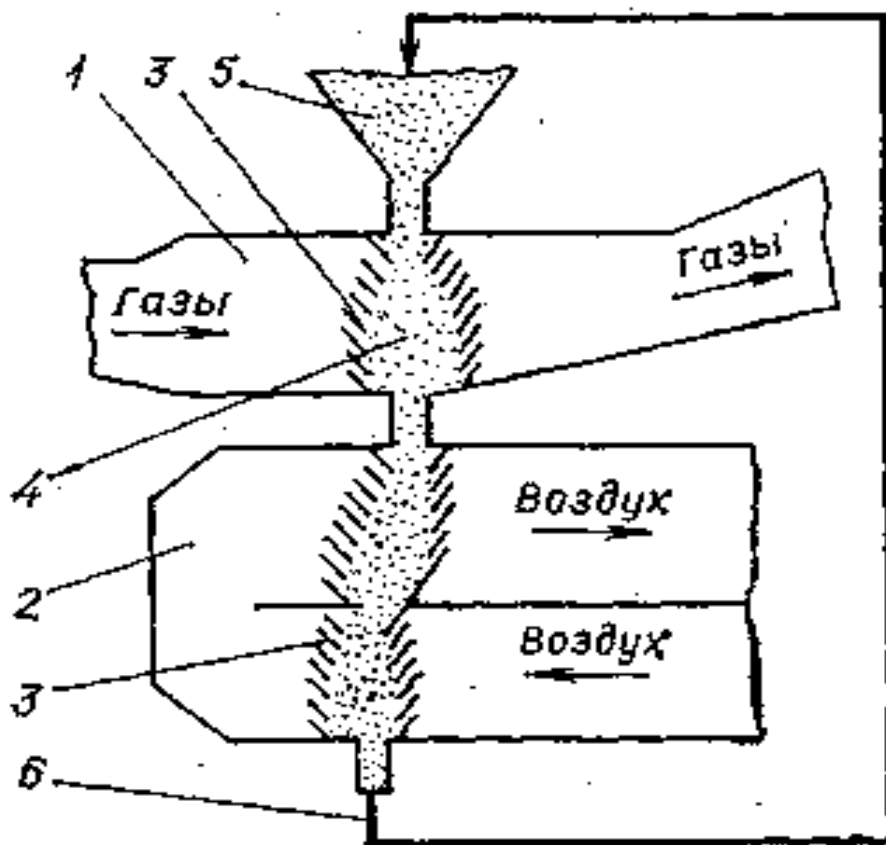


Рис. 3.6. Схема регенеративного теплообменника с падающей насадкой

В регенеративных теплообменниках непрерывного действия твердый теплоноситель перемещается с помощью механических ковшевых элеваторов, виброподъемников или пневматических устройств.

На рисунке 3.6 представлен РВП с падающим слоем твердого теплоносителя. Регенератор имеет камеры нагрева 1 и охлаждения 2 с установленными в них жалюзийными решетками 3, образующими вертикальный расширяющийся по ходу потока канал 4, подключенный к бункеру 5 подачи промежуточного сыпучего теплоносителя.

Греющий газ, отдавая свою теплоту промежуточному теплоносителю, поступающему из бункера 5, охлаждается до температуры выше точки росы, т.е. до коррозионнобезопасного уровня. Нагретый теплоноситель ссылается в камеру охлаждения, отдает теплоту воздуху и через подъемник 6 снова попадает в бункер. В теплообменнике загрузочный и разгрузочный штуцеры должны быть всегда заполнены

сыпучим теплоносителем для исключения перетекания газа из камеры охлаждения в камеру нагрева и обратно.

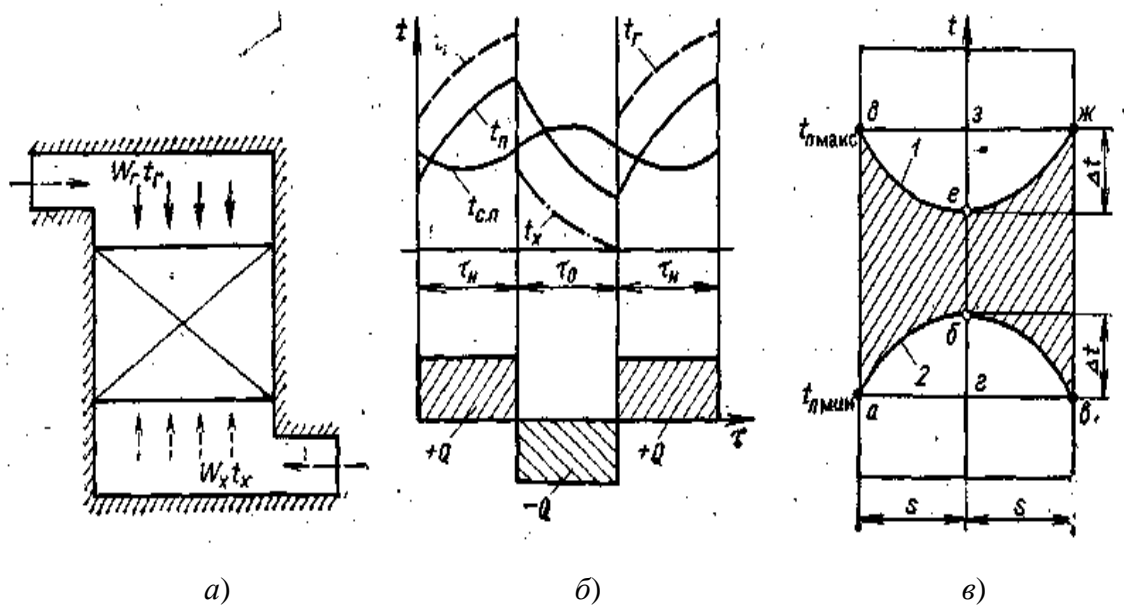
В регенераторах горячие и холодные теплоносители проходят через насадку поочередно. Вначале, например, сверху проходит горячий теплоноситель (дымовые газы), температура которого на входе равна  $t_r$  (рис. 3.7, а). Затем после прогрева насадки через нее пропускают холодный теплоноситель (воздух) с начальной температурой  $t_x$ , отбирающий теплоту от насадки. После этого остывшая насадка вновь нагревается горячим теплоносителем, и так периоды нагрева и охлаждений следуют непрерывно один за другим. Для большинства металлургических печей продолжительность нагревания насадки  $t_n$  равна продолжительности ее охлаждения  $\tau_0$ . Элементы насадки нагреваются и охлаждаются при граничных условиях второго рода, т.е. при постоянном тепловом потоке на поверхности элемента, поэтому изменения тепловых потоков и температуры в насадке можно характеризовать кривыми, представленными на рис. 3.7, б.

При нагревании насадки прогревается каждый ее элемент (например, кирпич), причем она аккумулирует теплоту ( $+Q$ ). При охлаждении насадки аккумулированная теплота передается воздуху ( $-Q$ ). Для ускорения этих процессов элементы (кирпичи) нагревают и охлаждают симметрично с обеих поверхностей. Изменение температуры движущихся через насадку газовых сред согласуется с изменением температуры поверхности кирпича. Различие между этими температурами обусловлено условиями внешнего по отношению к элементу теплообмена.

Температура средней плоскости кирпича  $t_{c.п}$  отстает от температуры поверхности  $t_{п.}$ . Это явление наступает не сразу после начала периодов нагревания или охлаждения и определяется прежде всего теплофизическими свойствами материала элемента и его размерами. Отмеченные особенности влияют и на формирование температурных полей по сечению элемента, которые приведены на рис. 3.7, в.

Желательно, чтобы аккумулировали и отдавали теплоту все элементы насадки. Степень такого участия оценивается *коэффициентом аккумуляции теплоты*  $\eta$  или, как иногда его называют, коэффициентом использования элемента (кирпича) в насадке. Коэффициент  $\eta$  представляет собой отношение количества теплоты, поглощенной кирпичом в реальном процессе, к теплоте, которая могла бы быть аккумулирована при отсутствии внутреннего теплового сопротивления кирпича.

Широко распространены и перспективны процессы взаимодействия газов и жидкостей с твердыми зернистыми материалами, в которых твердые частицы становятся подвижными относительно друг друга за счет обмена энергией с взвешивающим их потоком. Такое состояние зернистого материала получило название псевдооживленного или кипящего слоя вследствие внешнего сходства с поведением обычной капельной жидкости.



**Рис. 3.7. Регенеративный теплообменник:**

*a* – схема; *б* – изменение температуры горячего теплоносителя (дымовые газы)  $t_r$ , поверхности  $t_n$  и средней плоскости кирпичной насадки и холодного теплоносителя (воздуха)  $t_x$  во времени при граничных условиях второго рода; *в* – распределение температуры в насадке по толщине кирпича в конце периодов нагревания и охлаждения

Кипящему слою присущи свойства жидкости: текучесть, вязкость, поверхностное натяжение. Процессы, в которых осуществляется псевдооживление твердых материалов, применяют в различных отраслях промышленности. К ним относятся, например, химические процессы: каталитический крекинг нефтепродуктов, газификация топлив, обжиг различных руд; физические и физико-химические процессы: сушка мелкозернистых, пастообразных и жидких материалов, термическая обработка металлов, нагревание и охлаждение газов, механические процессы: обогащение, гранулирование, смешивание и транспортировка зернистых материалов и др.

Широкое внедрение псевдооживления в промышленную практику обусловлено рядом его преимуществ. Твердый зернистый, материал в псевдооживленном состоянии вследствие текучести можно перемещать по трубам, что позволяет многие процессы осуществлять непрерывно. Особенно выгодно применение псевдооживленного слоя в процессах, скорость которых определяется термическим или диффузионным сопротивлением в газовой фазе. Эти сопротивления в условиях псевдооживления уменьшаются в десятки раз, а скорость процессов соответственно увеличивается. Благодаря интенсивному перемешиванию твердых частиц в псевдооживленном слое практически выравнивается поле температур, устраняется опасность значительных перегревов и связанных с этим нарушений в протекании ряда технологических процессов.

Наряду с достоинствами псевдооживленному слою присущи и недостатки. Так, вызванное интенсивным перемешиванием твердых частиц выравнивание температур и концентраций в слое приводит к уменьшению движущей силы процесса. Иногда проскок значительных количеств газа без достаточного контакта с твердым зернистым материалом уменьшает выход целевого продукта. Отрицательными факторами следует также считать истирание и измельчение твердых

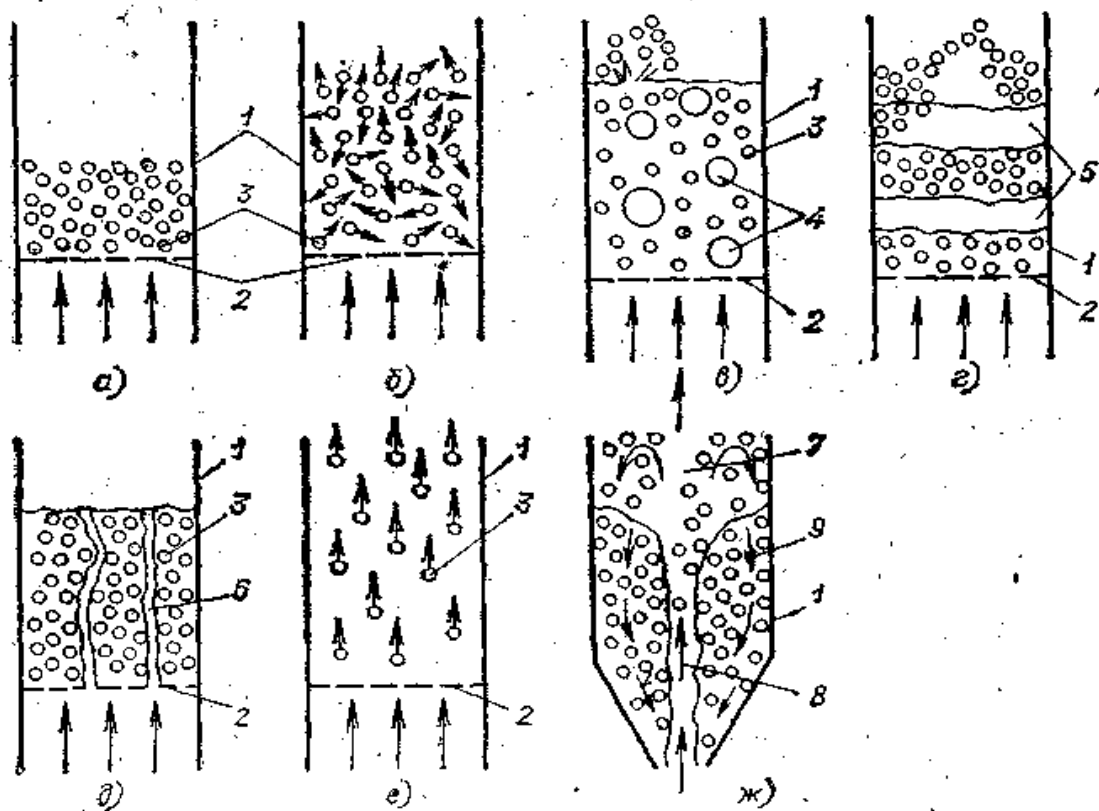
частиц, эрозию аппаратуры, возникновение значительных зарядов статического электричества, необходимость установки мощных газоочистительных устройств. Процессы в кипящем слое создаются при больших затратах энергии. Некоторые недостатки могут быть устранены за счет совершенствования конструкций аппаратов.

Принцип образования кипящего слоя состоит в следующем. Если под слой зернистого материала, расположенного на поддерживающей решетке, подавать поток теплоносителя (газа или жидкости), то состояние слоя оказывается различным в зависимости от скорости потока. При плавном ее увеличении от нуля до некоторого первого критического значения  $w'_0$  происходит обычный процесс фильтрования, при котором твердые частицы неподвижны (рис. 3.8, а), порозность слоя  $\epsilon$  неизменна, а его гидродинамическое сопротивление  $\Delta p$  возрастает с ростом скорости  $w$ .

При достижении скорости  $w'_0$  гидродинамическое сопротивление зернистого слоя становится равным его весу, слой взвешивается, нарушается контакт частиц, они получают возможность перемещаться и перемешиваться; слой расширяется, в нем наблюдается проскакивание газовых пузырьков. При дальнейшем росте скорости потока до некоторого значения  $w''_0$  слой продолжает расширяться, и интенсивность движения частиц увеличивается. При  $w > w''_0$  твердые частицы начинают выноситься из слоя. Скорость  $w'_0$  называется скоростью начала псевдооживления, а скорость  $w''_0$  – скоростью начала уноса.

После перехода в псевдооживленное состояние слой несколько расширяется, он однороден, его верхний уровень – свободная поверхность, она практически неподвижна, перемещение частиц выражено слабо (рис. 3.8, б). С ростом скорости газа слой расширяется, в его объеме появляются газовые пузыри (нарушается однородность), повышается интенсивность перемешивания частиц, возникают колебания

свободной поверхности слоя (рис. 3.8, в). При выходе из слоя пузыри, прорывая его свободную поверхность, вызывают ее колебания и появление выброса твердых частиц. В узких и высоких слоях восходящие пузыри могут сливаться и занять все поперечное сечение, образуя перемещающиеся вверх газовые «пробки», которые чередуются с движущимися «поршнями» твердых частиц (рис. 3.8, з). В таком поршнеобразном псевдооживленном слое перемешивание твердых частиц в вертикальном направлении затруднено.



**Рис. 3.8. Различные состояния слоя зернистого материала при прохождении через него потока газа (жидкости):**

*а* – неподвижный слой; *б* – кипящий слой при  $w > w''_0$ ; *в* – слой с барботажем газовых пузырей; *г* – поршнеобразный слой; *д* – слой со сквозными каналами; *е* – унос твердых частиц при  $w \gg w''_0$ ; *ж* – фонтанирующий слой;

1 – корпус аппарата; 2 – опорно-распределительная решетка;

3 – твердые частицы; 4 – газовые пузыри; 5 – газовые «пробки»;

6 – сквозные каналы; 7 – фонтан; 8 – осевое ядро слоя;

9 – сползающий слой твердых частиц

В слое твердых частиц, склонных к агрегированию, при скоростях газа, незначительно превышающих  $w'_0$ , образуются сквозные каналы (рис. 41, *д*), через которые газ проходит без достаточного контакта с твердыми частицами. Эти каналы часто либо полностью исчезают при увеличении скорости газа, либо сохраняются лишь в основании слоя. При высоких давлениях, когда плотности газа и твердых частиц соизмеримы, слой приближается к однородному.

При  $w \geq w''_0$  твердые частицы начинают выноситься из слоя (рис. 3.8, *е*) и их количество в аппарате уменьшается. Порозность такого слоя стремится к единице, а сопротивление слоя резко падает.

При псевдооживлении зернистых материалов в коническо-цилиндрических и конических аппаратах с углом в вершине более  $15...20^\circ$  возможно образование фонтанирующего слоя (рис. 3.8, *ж*). Здесь газ, проходя преимущественно в центральной зоне слоя, увлекает твердые частицы и фонтаном выбрасывает их к периферии, где они сползают вниз вдоль боковой поверхности.

Важную роль в аппаратах с псевдооживленным слоем зернистого материала играет конструкция опорно-распределительной решетки. К последней предъявляют ряд требований: равномерное распределение потока газа (жидкости) по сечению аппарата и исключение образования застойных зон в слое, предотвращение провала твердых частиц при внезапном уменьшении скорости потока, минимальное гидравлическое сопротивление, простота конструкции и удобство эксплуатации.

Конструктивно наиболее простыми являются плоские перфорированные или полусотовые решетки с круглыми или продолговатыми отверстиями (рис. 3.9, *а*), которые не исключают, однако, образования застойных зон на участках между отверстиями для прохода газа (жидкости). Отмеченного недостатка не имеют сотовые решетки (рис. 3.9, *б*), но они сложны в изготовлении. На рисунке 3.9, *в* и *г* показаны схемы

двух беспровальных решеток: первая изготовлена из перфорированных плоских металлических листов, вторая сварена из уголков.

В аппаратах небольших размеров оправдало себя газораспределительное устройство в виде конусного распределения – диффузора с боковым тангенциальным вводом потока теплоносителя (рис. 3.9, д).

Равномерность псевдоожижения зависит не только от конструкции опорно-распределительной решетки, но и от размеров и формы твердых частиц, от скорости оживающего агента, способа его подвода и других факторов. На практике доля живого сечения решетки обычно составляет 1...10% ее площади.

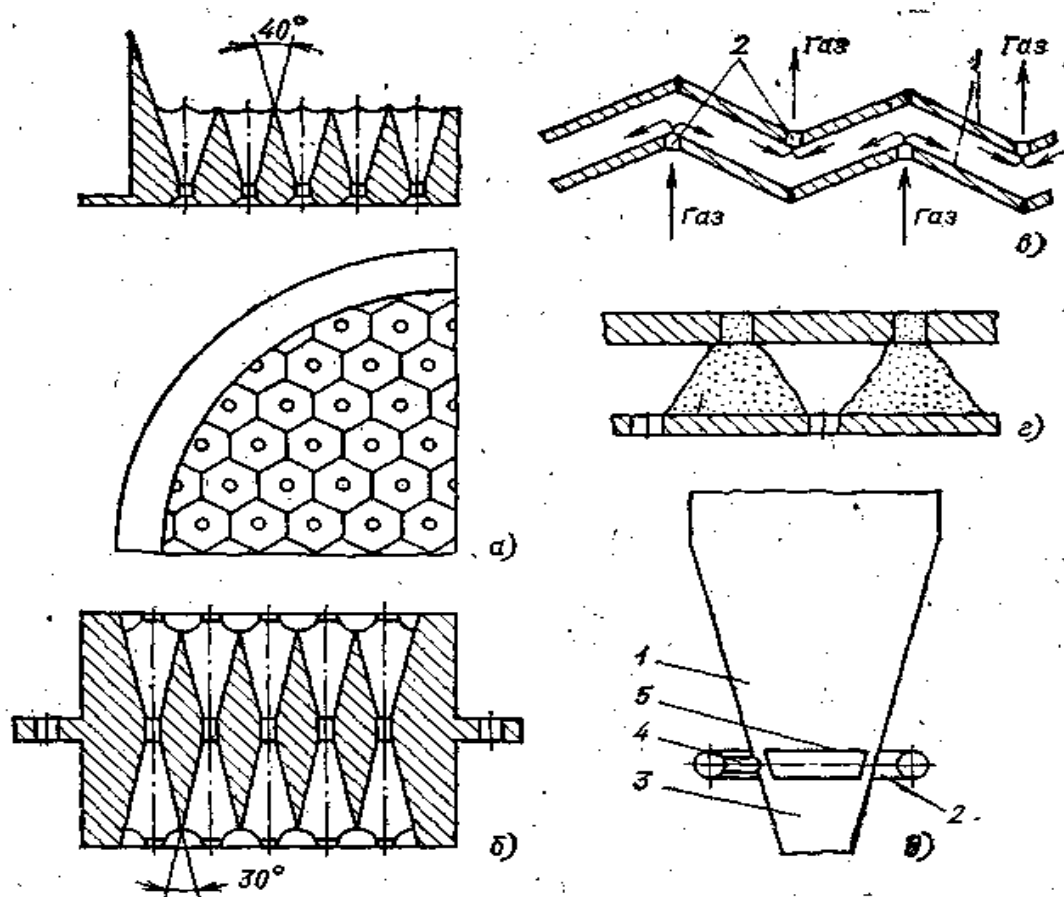


Рис. 3.9. Принципиальные схемы опорно-распределительных устройств:

*а* – полусотовая решетка; *б* – сотовая решетка; *в* – беспровальная угловая решетка; *г* – беспровальная плоская решетка; *д* – конусный распределитель;

*1* – диффузор; *2* – коллектор газа; *3* – выход твердого материала;

*4* – подвод газа; *5* – защитный конус

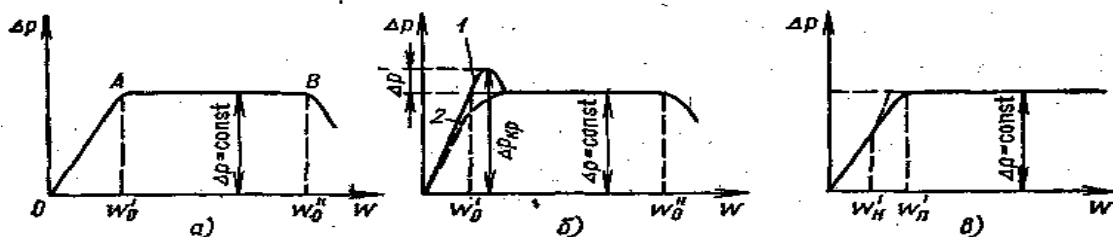


Слои зернистых материалов могут состоять из частиц одинакового (монодисперсный слой) и различных (полидисперсный слой) диаметров. Важнейшими характеристиками зернистого слоя являются относительная объемная доля пустот – порозность  $\varepsilon$ , размер частиц  $d$ , их форма и удельная площадь поверхности  $f$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ . Если в объеме зернистого слоя  $V_0$ ,  $\text{м}^3$ , содержится  $V$ ,  $\text{м}^3$  плотного (монокристаллического) материала, то

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V}{V_0} = 1 - \frac{V}{V_0}. \quad (3.1)$$

Состояние псевдооживленного слоя изображается «кривой псевдооживления», выражающей зависимость перепада давления  $\Delta p$  в слое (не считая решетки) от скорости оживляющей среды  $w$  в незаполненном сечении аппарата. На рисунке 3.10 показана кривая идеального псевдооживления монодисперсного слоя твердых частиц в аппарате постоянного, поперечного сечения. Восходящая ветвь  $OA$  (прямая при ламинарном течении и кривая при других режимах) соответствует движению оживляющей среды через неподвижный зернистый слой.

Абсцисса точки  $A$  ( $w = w'_0$ ) соответствует скорости начала псевдооживления, а горизонтальный участок  $AB$  – псевдооживленному состоянию, характеризующемуся равенством сил давления потока на слой твердых частиц и их веса; здесь сохраняется равенство  $\Delta p = \text{const}$ . Абсцисса точки  $B$  выражает скорость начала уноса  $w''_0$ . При скорости  $w \gg w''_0$  твердые частицы выносятся потоком и уменьшается  $\Delta p$ .



**Рис. 3.10. Изменение перепада давления в слое зернистого материала в зависимости от скорости среды  $w$ :**

$a$  – кривая идеального псевдооживления;  $b$  – реальные кривые псевдооживления;  
 $v$  – кривая псевдооживления полидисперсного материала

В реальных условиях кривая псевдооживления (кривая 1 на рис. 3.10, б) отличается от идеальной. За пределами  $w'_0$  значение  $\Delta p$  продолжает расти. В этот момент давление газа достигает максимального значения  $\Delta p_{кр}$  и соответствует весу материала плюс некоторому перепаду  $\Delta p'$ , необходимому для затраты энергии на отрыв частиц друг от друга, а также на преодоление силы их трения о стенку. Значение максимального давления определяется плотностью первоначальной засыпки зерен, их формой и состоянием поверхности, геометрической формой аппарата, конструкцией опорно-распределительной решетки. После перехода слоя в псевдооживленное состояние сопротивление его резко падает до характерного уровня  $\Delta p$ . В аппаратах постоянного поперечного сечения  $\Delta p' = (0,05 \dots 0,15) \Delta p$ , в конусных аппаратах  $\Delta p'$  значительно выше.

Кривая 2 на рисунке 3.10, б соответствует кривой обратного хода, т.е. уменьшению скорости от  $w''_0$  до нуля. Меньшие значения  $\Delta p$  для неподвижного слоя по кривой обратного хода обусловлены более рыхлой засыпкой слоя в результате понижения скорости  $w$ .

Скорость начала уноса твердых частиц из монодисперсного псевдо-оживленного слоя  $w''_0$  также не поддается точному расчету из-за ее сложной зависимости от множества факторов (размера и формы частиц, количества и размера газовых пузырей, профиля скорости потока оживающей среды в поделовом пространстве и др.). Явление еще больше усложняется в случае полидисперсного слоя. В связи с этим для приближенного определения  $w''_0$  ее принимают равной скорости витания (осаждения) одиночных частиц.

## 4. СМЕСИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

---

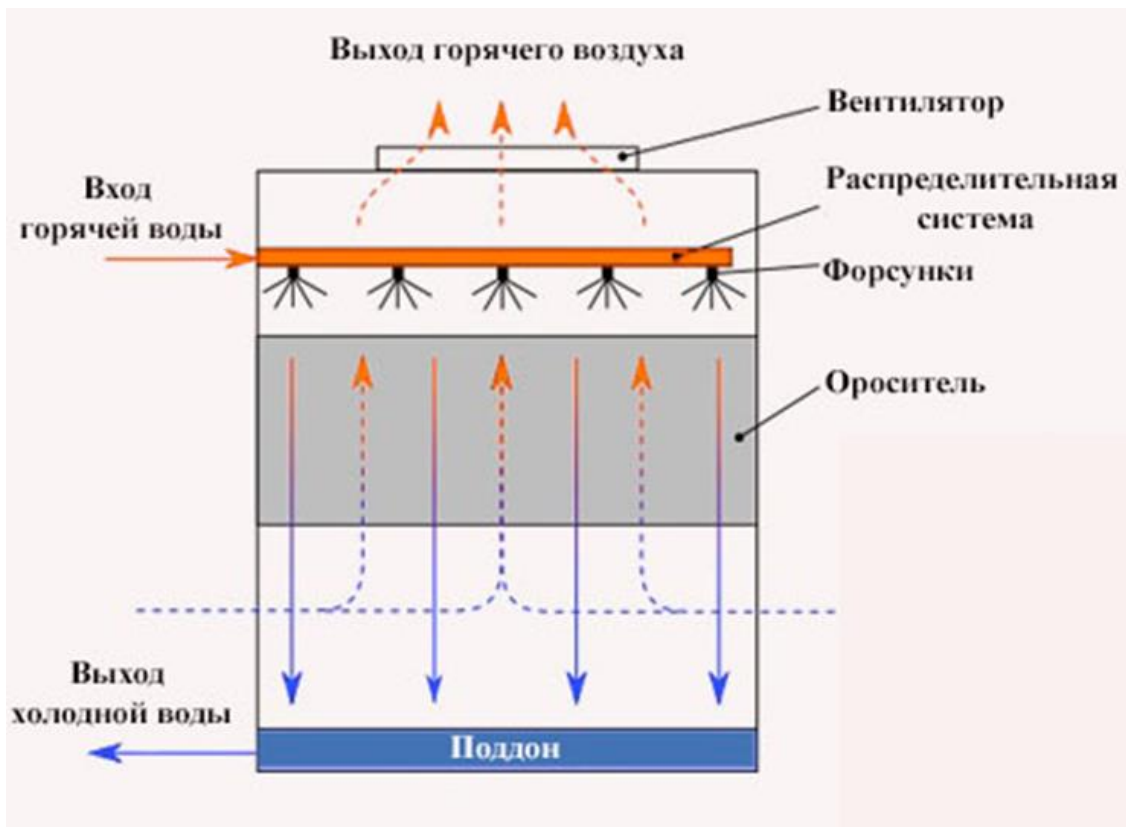
Широкое применение в промышленности нашли смесительные теплообменные аппараты, в которых теплообмен между теплоносителями происходит при непосредственном контакте теплоносителей, т.е. при их смешении. Наибольшее количество смесительных теплообменных аппаратов являются непрерывно действующими. По способу организации процесса смесительные аппараты следует разделить на:

- барботажные;
- сопловые;
- градирни;
- барометрические конденсаторы.

Различные теплообменники смешения используются в различных технологических процессах:

- в градирнях осуществляется охлаждение воды за счет теплообмена с воздухом окружающей среды;
- сопловые подогреватели используются для нагрева жидкости за счет теплоты воздуха, газа или пара;
- нагрев воды и водных растворов, допускающих разбавление, путем смешения ее с водяным паром осуществляется в барботажных аппаратах;
- для конденсации водяных паров после выпарных установок используются барометрические конденсаторы.

Большие объемы горячей воды эффективнее охлаждать в градирнях. Принципиальная схема работы градирни представлена на рис. 4.1. Горячая вода распыскивается и мелкие капли контактируют с окружающим воздухом. При контакте горячей воды и воздуха вода охлаждается, часть воды испаряется. Охлажденная вода собирается в нижней части аппарата.



**Рис. 4.1. Принципиальная схема мокрой градирни**

В зависимости от способа распределения горячей воды мокрые градирни бывают эжекторные и оросительные.

В эжекторных градирнях вода поступает в аппарат в виде мелко-дисперсной фазы (размер капель не превышает 0,2 мм) с высокой скоростью (до 20 м/с) и затягивает с собой воздух окружающей среды. Смешиваясь с воздухом, вода охлаждается. Основным преимуществом эжекторных градирен является возможность работы при высоких температурах охлаждаемой воды. К недостаткам следует отнести при высоком давлении (4...7 ат.) невозможность эксплуатации в зимнее время.

В оросительных градирнях используются сетчато-пленочные оросители. Горячая вода распыляется через сопла на ороситель. Вода стекает пленкой или каплями на ороситель, что увеличивает поверхность контакта горячего и холодного теплоносителя. В результате

теплообмена нагретый воздух удаляется из аппарата, а охлажденная вода собирается в бассейне накопителе. Воздух окружающей среды поступает в аппарат за счет естественной тяги (осуществляется в башенных градирнях) или вентилятором (осуществляется в вентиляторных градирнях). Внешний вид эжекторной и оросительной градирен представлен на рис. 4.2.



*a)*



*б)*

**Рис. 4.2. Внешний вид эжекторной (а) и оросительной (б) градирен**

Самое широкое распространение получили башенные градирни в процессах охлаждения горячей воды на больших промышленных предприятиях, теплоэлектростанциях и АЭС. Они способны понизить температуру большого количества воды на 5...10 °С и работают без потребления внешней энергии.

Сопловые смесительные теплообменники используются для охлаждения (реже для нагрева) жидкостей при непосредственном контакте со вторым теплоносителем. По конструктивным признакам теплообменники делятся на:

1) полые или безнасадочные колонны или камеры, в которых распыливание жидкости в газовую среду, осуществляется форсунками; соприкосновение между жидкостью и газом при этом происходит на поверхности образующихся капель жидкости;

2) каскадные аппараты, имеющие внутри горизонтальные либо наклонные полки или перегородки, по которым жидкость стекает сверху вниз под действием гравитационных сил;

3) насадочные колонны, в которых соприкосновение газа с жидкостью происходит на смоченной поверхности насадки (деревянные доски, рейки, куски кокса и прочие устройства), обеспечивающие пленочное стекание жидкости.

На рисунке 4.3 представлены различные конструкции смесительных теплообменников.

Для подачи жидкости в аппараты используются различные форсунки (рис. 4.4):

- механическая (*a*);
- пневматическая (*б*);
- центробежная (*в*);
- брызгалка (*г*);
- однотарельчатый разбрызгиватель (*д*);
- многотарельчатый разбрызгиватель (*е*).

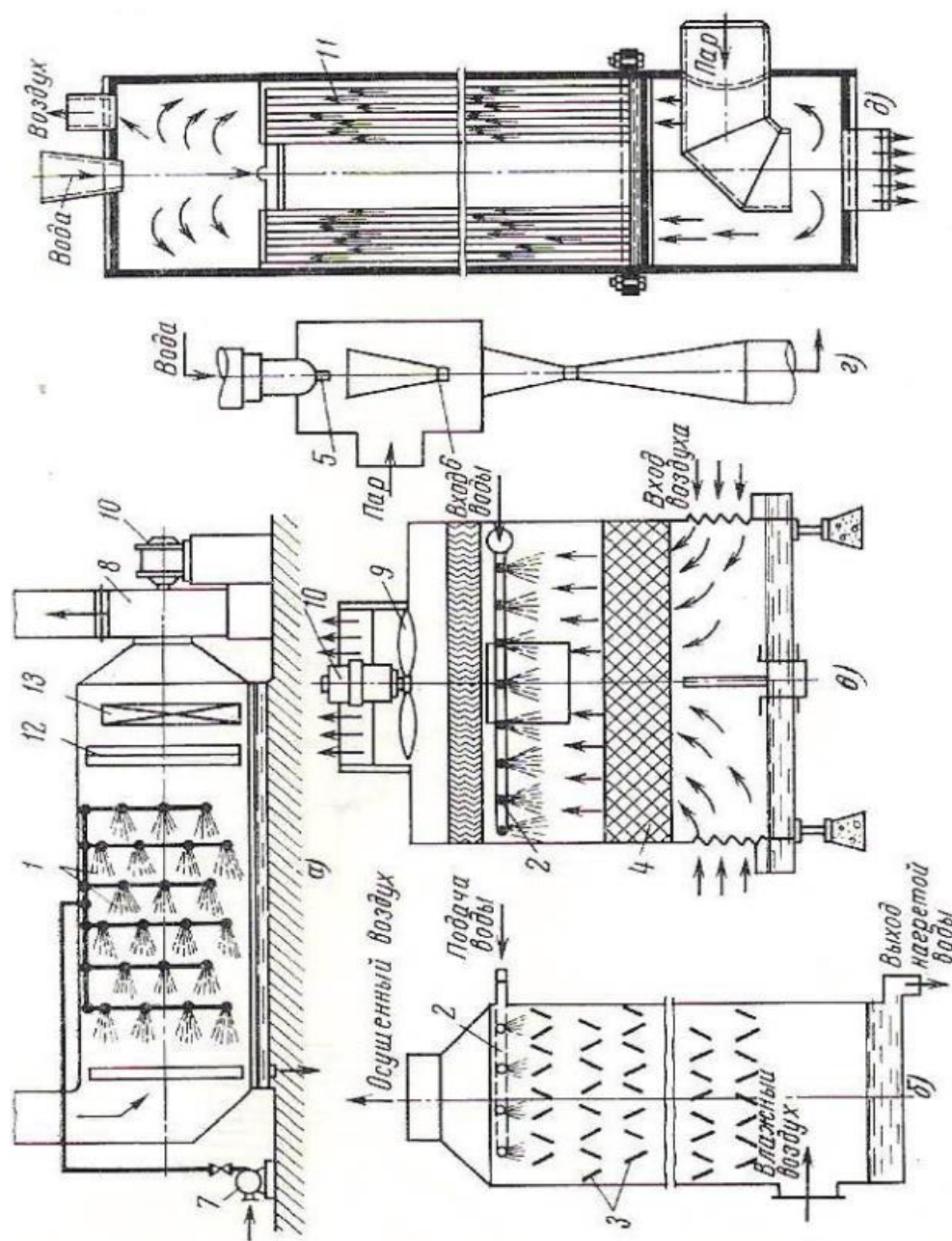


Рис. 4.3. Типы смешительных теплообменников:

*a* – безнасадочный форсуночный; *б* – каскадный; *в* – насадочный; *г* – струйный; *д* – пленочный с насадкой из цилиндров

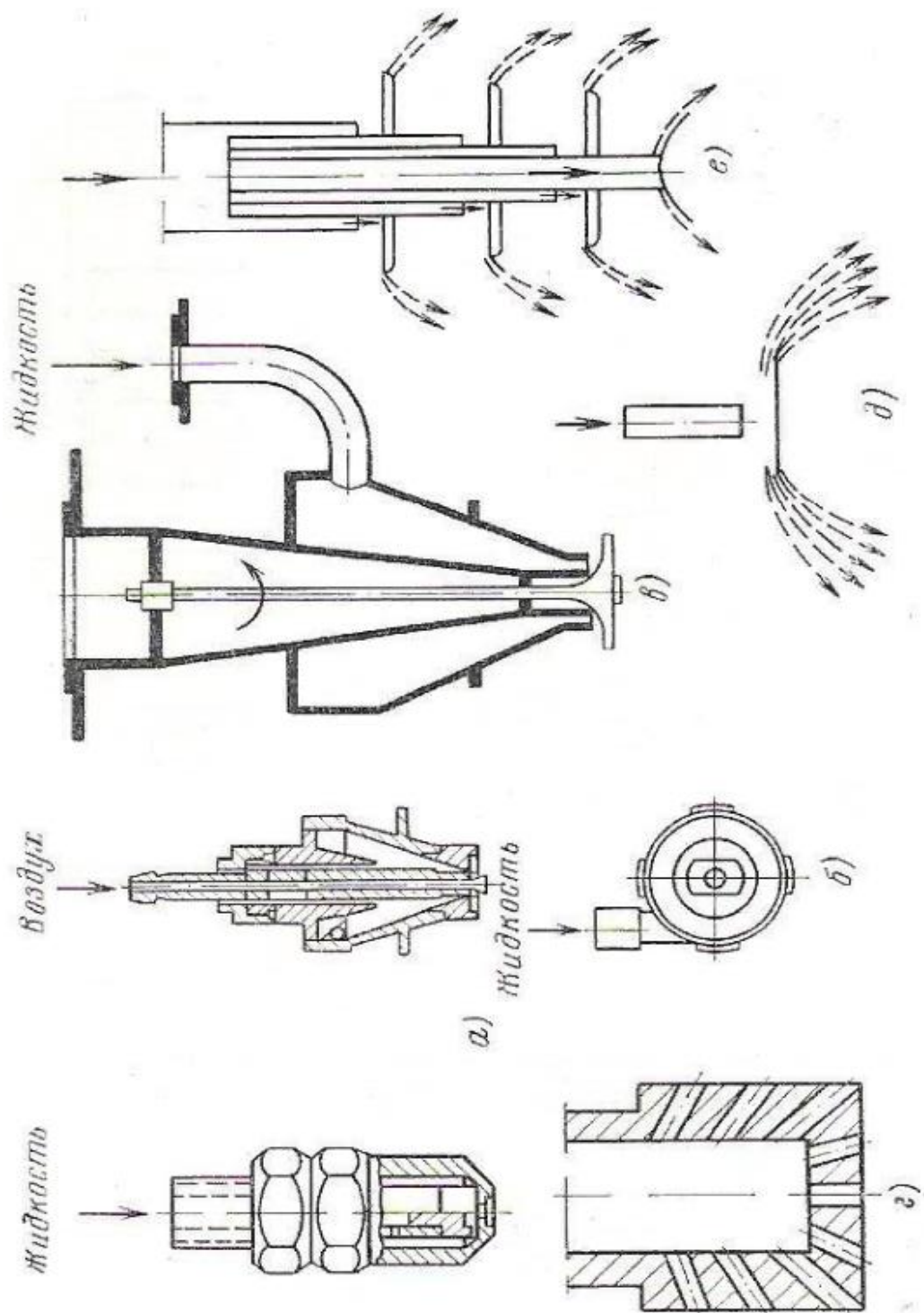


Рис. 4.4. Форсунки и разбрызгивающие устройства смесительных теплообменников



Насадочные колонны более компактны по сравнению с безнасадочными, но характеризуются более высоким гидравлическим сопротивлением.

Конструкция пленочных смесительных теплообменников проще, чем у поверхностных теплообменников, аппараты компактнее и легче. Процесс теплопередачи происходит при непосредственном контакте теплоносителей, поэтому коэффициент теплопередачи не зависит от загрязнения поверхности трубок. Аппараты такого типа обычно работают под избыточным давлением (1...5 ат.).

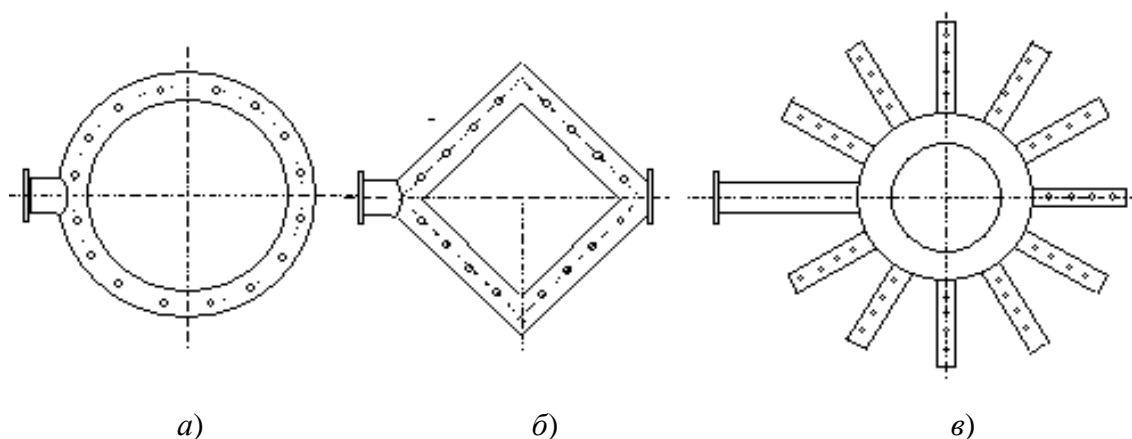
К недостаткам пленочных теплообменников следует отнести возможную коррозию стенок аппарата из-за наличия в теплоносителях значительного количества кислорода.

Каждому типу смешивающих теплообменников свойственны некоторые особенности, которые следует учитывать при выборе аппарата. Аппараты с насадкой просты по конструкции, дешевы, и для их изготовления пригодны недефицитные строительные материалы – бетон, керамика, стекло, фарфор. Для оросителей насадочных аппаратов требуется незначительное избыточное давление орошающей жидкости. Однако габариты и масса насадочных аппаратов значительны; они требуют устройства массивных фундаментов и отличаются значительным гидравлическим сопротивлением по газовой фазе по сравнению с каскадными и безнасадочными аппаратами, особенно при использовании нерегулярной насадки. Насадочные аппараты не используются с теплоносителями, содержащими взвешенные частицы из-за засорения насадки; и при небольших расходах теплоносителя, который не обеспечивает необходимой для хорошего смачивания насадки плотности орошения.

Безнасадочные аппараты отличаются малым сопротивлением по газовому потоку и наиболее экономичны по расходу охлаждающей

жидкости, однако для ее диспергирования с помощью как форсунок, так и дисковых распылителей требуется значительный расход энергии. Безнасадочные аппараты отличаются большими габаритами.

Барботажные смесительные теплообменники используются для конденсации паров, нагрева или охлаждения жидкости при непосредственном контакте жидкости и газа (пара). Принципиальным отличием барботажных теплообменников от остальных является необходимость распределения газовой фазы в жидкой среде (устройство барботера). Основной целью барботера является равномерное распределение газовой фазы по объему аппарата. Барботеры бывают напорные и безнапорные. Конструктивно-напорный барботер представляет собой либо перфорированные трубки, либо устройство подачи, выполненное из пористого материала и расположенное в нижней части теплообменника, максимально покрывая дно. К безнапорным барботерам относятся желобчатые тарелки, решетки и диффузоры. В промышленности применяются в основном трубчатые барботеры, представляющие собой перфорированные трубы различной геометрической формы: лучевой, прямоугольный, кольцевой (рис. 4.5). Диаметр отверстий обычно от 1 до 7 мм.



**Рис. 4.5. Основные типы барботеров:**

*a* – прямоугольный; *б* – кольцевой; *в* – лучевой

Пористые распределительные устройства изготавливаются спеканием из мелкодисперсных частиц стекла, керамики или металлов. Они имеют довольно равномерное распределение пор-отверстий по поверхности материала и обеспечивают малый  $d$  образующихся пузырей.

Одним из видов барботажных смесительных теплообменников является барометрический конденсатор. Он предназначен для конденсации водяных паров водой, образованных при выпаривании водных растворов в выпарных установках. Конструктивно-барометрические конденсаторы – это полочные или насадочные аппараты с организованным противоточным движением теплоносителей. Конденсация пара происходит при непосредственном контакте с охлаждающей водой и образованием теплой воды, которая отводится из нижней части аппарата по барометрической трубе в барометрический ящик (рис. 4.6). Барометрические конденсаторы могут быть «сухие» (не сконденсировавшиеся газы отводятся через верхний штуцер, а конденсат – через нижний) или «мокрые» (не сконденсировавшиеся газы и конденсат отводят через нижний штуцер). Наличие барометрической трубы обусловлено компенсацией давления в аппарате, которое обычно ниже атмосферного.

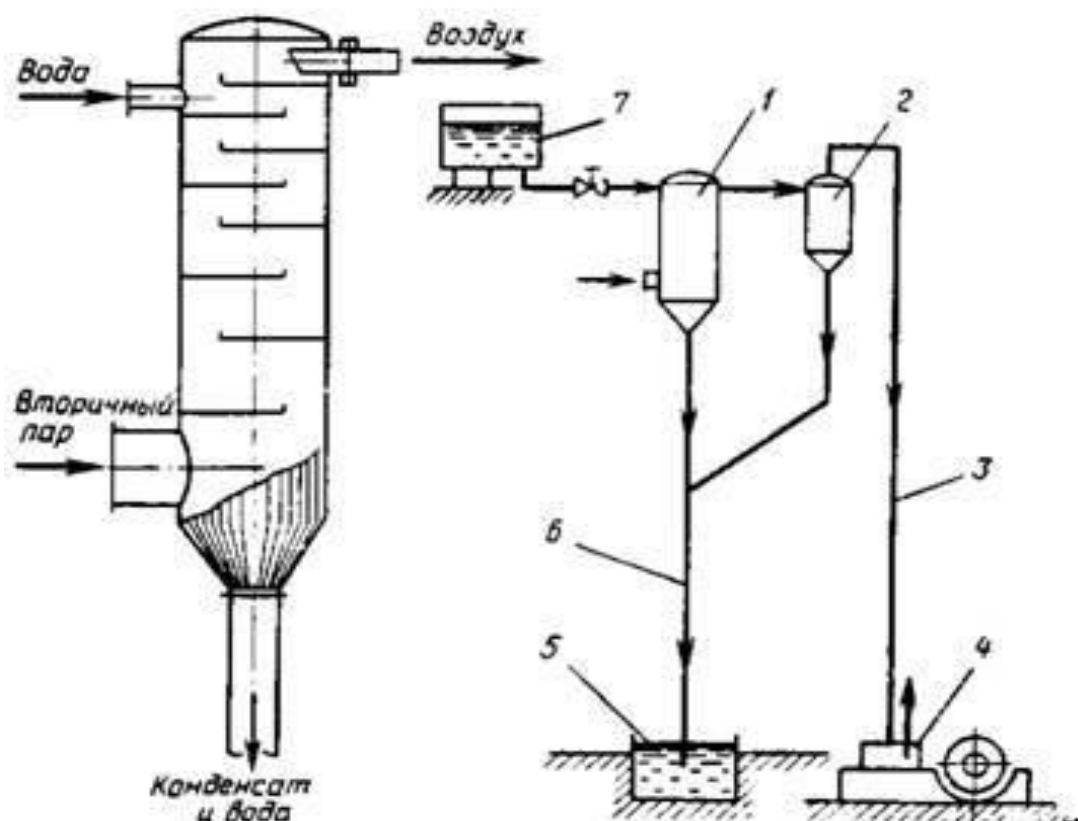
В насадочных аппаратах процесс теплопереноса осуществляется интенсивнее, однако данные аппараты характеризуются значительно более высокими значениями гидравлического сопротивления.

Высота барометрической трубы барометрического конденсатора складывается из трех составных частей:  $h_1$  – высота столба жидкости, уравнивающая разность давлений в корпусе и атмосферного,  $h_2$  – высота столба жидкости, создающая динамический напор, обеспечивающий движение жидкости по трубе с заданной скоростью,  $h_3$  – высота трубы, обеспечивающая запас на случай колебания атмосферного давления, м:

$$H = h_1 + h_2 + h_3, \quad (4.1)$$

$$h_1 = 10,33 \cdot \frac{B}{760}, \text{ м}, \quad h_2 = \frac{w^2}{2g} \left( 2,5 + \lambda \frac{H}{d} \right), \text{ м}, \quad h_3 = 0,5, \text{ м},$$

где  $B$  – разряжение в аппарате;  $w$  – скорость течения воды (1,5...2,0 м/с);  
 $d$  – диаметр трубы.



**Рис. 4.6. Полочный «сухой» барометрический конденсатор:**

- 1 – конденсатор; 2 – брызгоуловитель; 3 – линия отвода  
 несконденсировавшихся газов; 4 – линия к вакуум-наосу;  
 5 – барометрический ящик; 6 – барометрическая труба;  
 7 – емкость охлаждающей воды

## 5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

К специальным теплообменникам относят аппараты, в которых процесс теплообмена между теплоносителями происходит в специальных условиях: аппараты с рубашкой; аппараты с приваренными снаружи змеевиками. Также сюда следует отнести теплообменники, в которых тепло генерируется из другого вида энергии (электрической, магнитной, звуковой).

Простота конструкции и удобство эксплуатации характеризует теплообменный аппарат с рубашкой (рис. 5.1). Широкое распространение аппаратов данного типа обусловлено удобством подвода и отвода тепла в ходе проведения других технологических процессов (смешения, химического синтеза и т.п.).

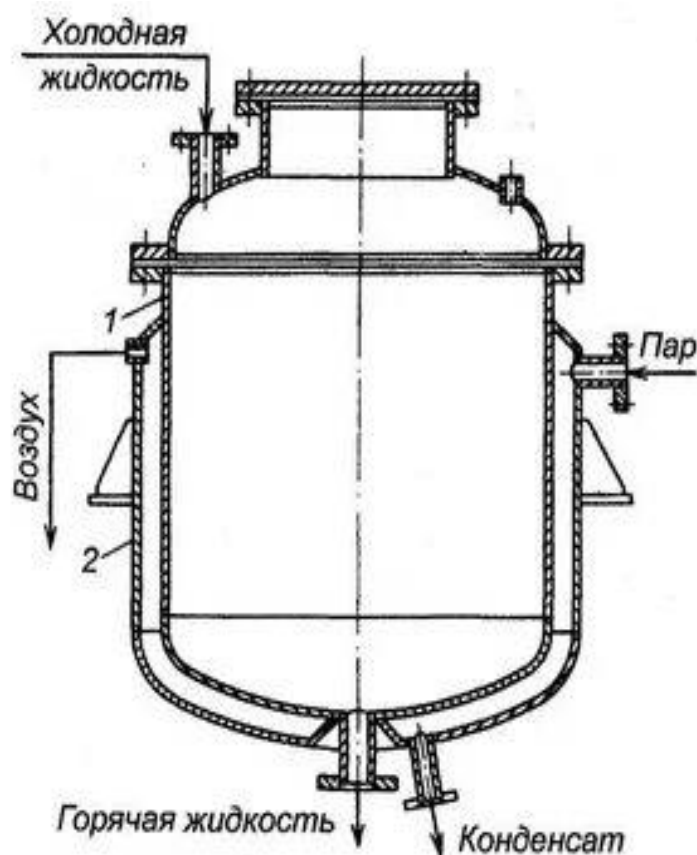
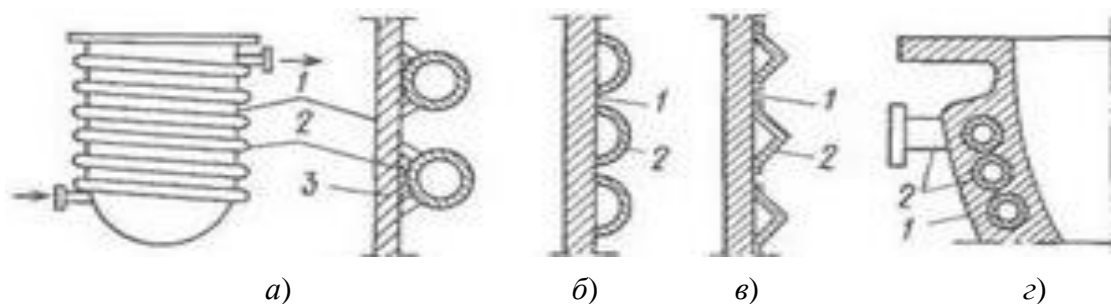


Рис. 5.1. Теплообменный аппарат с рубашкой



**Рис. 5.2. Аппараты с наружными змеевиками:**

*a – в* – со змеевиками различной формы;  
*г* – со змеевиками в стенке теплообменника

Поверхностью контакта холодного и горячего теплоносителя является поверхность аппарата. Использование таких аппаратов ограничено небольшой поверхностью теплообмена (до  $10 \text{ м}^2$ ) и давлением в рубашке (до 1 МПа). При проведении процесса нагревания среды в рубашку чаще всего подают водяной пар, а при проведении охлаждения – воду. Если возникает необходимость создания нулевых температур, то в рубашку аппарата может подаваться охлажденный рассол или ледяная крошка.

Помимо аппарата с рубашкой, используются аппараты с приваренными снаружи теплообменниками. Такой вид теплообменника можно изготовить из требуемого в производстве емкостного аппарата. Теплоноситель подают в согнутый змеевик, приваренный снаружи к корпусу. Для улучшения теплообмена между змеевиком 2 и корпусом 1 устанавливают фасонную металлическую прокладку 3, обеспечивающую плотное прилегание трубы к корпусу (рис. 5.2).

Широкое распространение подобные теплообменники нашли в производствах, требующих нагрев или охлаждение среды в емкостном аппарате, работающем при высоком давлении.

В последнее время начали развиваться исследования в области организации тепловых процессов с использованием электромагнитной и звуковой энергии. Так, электромагнитное излучение сверхвысокого частотного диапазона используется для нагрева воды в индукционных нагревателях. Принцип действия такого нагревателя представлен на рис. 5.3.

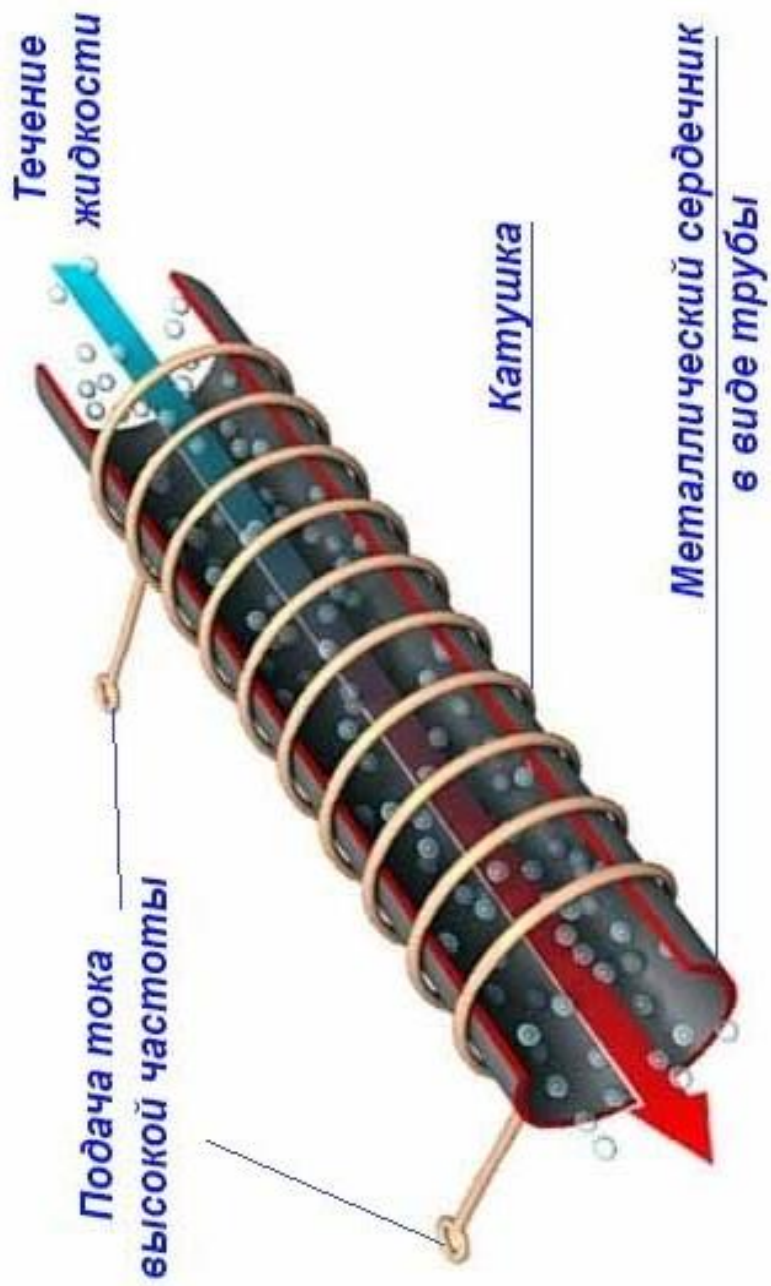


Рис. 5.3. Принцип работы инерционного водонагревателя

Электрический ток, проходящий по многовитковой металлической катушке цилиндрической формы, создает электромагнитное поле, т.е. катушка является индуктором. Находясь внутри замкнутого электромагнитного контура, вода подвергается электромагнитному воздействию, из-за чего электрическая энергия переходит в тепловую и нагревает воду.

Существует ряд разработок, предлагающих использование СВЧ-нагрева для испарения и дегидрирования углеводородов, проведения каталитических процессов. Ограничением в применении такого нагрева является температура 200 °С. В настоящее время изготавливаются проточные и накопительные индукционные водонагреватели. На рисунке 5.4 представлен промышленный проточный индукционный водонагреватель. К достоинствам индукционного нагревателя следует отнести:

- высокий КПД;
- компактность;
- бесшумность;
- легкость автоматизации;
- отсутствие накипи на стенках труб;
- безопасность.

Воздействие ультразвуковых колебаний (частотой 20...100 кГц) на жидкость характеризуется разделением молекул и ионов с различной массой, искажением формы волны, появлением переменного электрического поля, капиллярно-акустическим и тепловым эффектами, активацией диффузии. Использование данных явлений, в том числе и тепловых, в производственных целях значительно интенсифицирует проводимые процессы. Исследования в этой области находятся в стадии разработки и пока не широко используются в промышленности.





**Рис. 5.4. Индукционный водонагреватель**

## 6. РАСЧЕТ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ЖИДКОСТНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

---

В химической промышленности часто возникает задача охлаждения горячих жидкостей в количестве  $G_{г}$ , кг/с, от начальной температуры  $t_{г.н}$  до конечных  $t_{г.к}$  комнатных температур. Наиболее часто используемым холодным теплоносителем является вода (в количестве  $G_{х}$ , кг/с). В зависимости от имеющегося источника вода может быть из подземных источников (артезианская), наземных источников (речная, прудовая или озерная) или оборотная. Вид источника воды определяет ее начальную температуру  $t_{х.н}$ :

- артезианская 8 °С;
- из наземных источников 5...25 °С;
- оборотная 30 °С.

В ходе прохождения по теплообменному аппарату вода забирает тепло от горячего теплоносителя и нагревается. Максимальной конечной температурой  $t_{х.к}$  холодного теплоносителя в теплообменниках является 40 °С. Нагревание воды до больших температур сопровождается образованием накипи на стенках аппарата, что негативно влияет на процесс теплообмена.

Кожухотрубчатый аппарат представляет собой кожух с размещенными внутри трубками и имеет два пространства: трубное и межтрубное (рис. 6.1).

Трубное пространство кожухотрубчатого теплообменника представляет собой внутреннее пространство трубок. Межтрубное пространство ограничено внешней поверхностью трубок и кожухом, из-за чего конфигурация межтрубного пространства значительно сложнее, чем трубного.



**Рис. 6.1. Конструкция кожухотрубчатого теплообменника с U-образными трубками**

Важным пунктом в решении задачи является определение пространства теплообменника для каждого теплоносителя. В трубное пространство подается теплоноситель, более склонный к образованию осадка на стенках аппарата.

Если в техническом задании не обговорено направление движения теплоносителей по аппарату, то выбирают противоточное движение, как наиболее эффективное. При известных температурах теплоносителя можно рассчитать среднюю движущую силу процесса в аппарате:



**Рис. 6.2. Схема противоточного движения теплоносителей для расчета средней движущей силы**

$$\Delta t_{\text{левое}} = t_{\text{Г.Н}} - t_{\text{Х.К}}; \quad (6.1)$$

$$\Delta t_{\text{правое}} = t_{\text{Г.К}} - t_{\text{Х.Н}}. \quad (6.2)$$

Далее из двух найденных значений следует определить большее  $\Delta t_{\text{б}}$  и меньшее  $\Delta t_{\text{м}}$  и определить среднюю движущую силу:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}. \quad (6.3)$$

В ходе расчетов возникает необходимость определения средней температуры теплоносителя, поэтому определяют среднюю температуру холодного  $t_{\text{х}}$  и горячего  $t_{\text{г}}$  теплоносителя:

$$t_{\text{х}} = \frac{t_{\text{Х.Н}} + t_{\text{Х.К}}}{2}; \quad (6.4)$$

$$t_{\text{г}} = \frac{t_{\text{Г.Н}} + t_{\text{Г.К}}}{2}. \quad (6.5)$$

Для определения количества холодного теплоносителя, необходимого для проведения процесса, составляют тепловой баланс:

$$Q = G_{\text{х}} c_{\text{х}} (t_{\text{Х.К}} - t_{\text{Х.Н}}) = G_{\text{г}} c_{\text{г}} (t_{\text{Г.Н}} - t_{\text{Г.К}}), \quad (6.6)$$

где  $G_{\text{х}}$  – теплоемкость холодного теплоносителя;  $G_{\text{г}}$  – теплоемкость горячего теплоносителя, из которого находят количество холодного теплоносителя  $G_{\text{х}}$ , кг/с, и количество тепла  $Q$ , Вт, переданного от одного теплоносителя к другому.

Для прикидочных расчетов часто бывает достаточно определения ориентировочной поверхности теплообменника на основе выбранного ориентировочного значения коэффициента теплопередачи  $K_{\text{ор}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К). Для выбора ориентировочного значения коэффициента теплопередачи необходимо знать вид теплоносителей, характер движения теплоносителей и тип процесса (табл. 6.1).

Ориентировочная площадь  $F_{\text{ор}}$ , м<sup>2</sup>, теплообменника рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ор}} = \frac{Q}{K_{\text{ор}} \Delta t_{\text{ср}}}. \quad (6.7)$$

Зная значения площади, можно выбрать подходящий по площади стандартный теплообменник (табл. 6.2) либо спроектировать специальный теплообменник.

### 6.1. Значения ориентировочного коэффициента теплопередачи $K_{\text{ор}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Тип процесса	Теплоноситель 1	Теплоноситель 2	Вынужденное движение	Свободное движение
БИАС*	Газ	Газ	10...40	4...12
БИАС*	Газ	Жидкость	10...60	6...20
Конденсация пара	Пар	Газ	10...60	6...12
БИАС*	Жидкость	Вода	800...1700	140...340
БИАС*	Жидкость	Жидкость	120...270	30...60
Конденсация пара	Пар	Вода	800...3500	300...1200
Конденсация пара	Пар	Органические жидкости	120...340	60...170

\*Без изменения агрегатного состояния.

### 6.2. Основные характеристики одноходовых кожухотрубчатых теплообменников с трубами 25×2 мм

Диаметр кожуха, мм	Число труб	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>							Сечение, м <sup>2</sup>	
		Длина труб, м							$S_T \cdot 10^2$	$S_{\text{МП}} \cdot 10^2$
		1	1,5	2	3	4	6	9		
159	13	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>3</b>				0,5	0,4
273	37	<b>3,0</b>	<b>4,5</b>	<b>6,0</b>	<b>9</b>				1,3	0,9
325	62		<b>7,5</b>	<b>10</b>	<b>14,5</b>	<b>19,5</b>			2,1	1,3
400	411			<b>17</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>52</b>		3,8	2,0
600	257			<b>40</b>	<b>61</b>	<b>81</b>	<b>121</b>		8,9	4,0
800	466			<b>73</b>	<b>109</b>	<b>146</b>	<b>219</b>	<b>329</b>	16,1	6,9
1000	747				<b>176</b>	<b>235</b>	<b>352</b>	<b>528</b>	25,9	10,6
1200	1083					<b>340</b>	<b>510</b>	<b>765</b>	37,5	16,4

Для проведения точного расчета необходимо выбрать наиболее подходящий теплообменник с запасом площади, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения длины аппарата. Так, при получении в расчетах  $F_{ор} = 9 \text{ м}^2$ , следует выбрать теплообменник с диаметром кожуха 325 мм, который обеспечивает возможное изменение площади от 7,5 до 19,5  $\text{м}^2$ . Важными характеристиками при расчете кожухотрубчатого аппарата являются площади поперечного сечения трубного  $S_T$  и межтрубного  $S_{мп}$  пространства, зная которые, можно определить скорости движения фаз в аппарате. Допустим, холодный теплоноситель подается в трубное пространство, а горячий – в межтрубное, тогда скорости потоков будут равны:

$$w_x = \frac{G_x}{\rho_x S_T}; \quad (6.8)$$

$$w_\Gamma = \frac{G_\Gamma}{\rho_\Gamma S_{мп}}, \quad (6.9)$$

где  $\rho_x$  и  $\rho_\Gamma$  – плотности фаз при средней температуре,  $\text{кг/м}^3$ .

Зная скорости течения, можно определить режим течения теплоносителей, для чего необходимо определить критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}_x = \frac{w_x d_x \rho_x}{\mu_x}; \quad (6.10)$$

$$\text{Re}_\Gamma = \frac{w_\Gamma d_\Gamma \rho_\Gamma}{\mu_\Gamma}, \quad (6.11)$$

где  $d_x$  равен внутреннему диаметру трубки (0,021 м), так как приняли, что холодный теплоноситель подается в трубное пространство;  $d_\Gamma$  равен внешнему диаметру трубки (0,025 м), так как приняли, что горячий теплоноситель подается в межтрубное пространство.

Так же для расчетов понадобятся значения:  
критерия Прандтля:

$$\text{Pr}_x = \frac{c_x \mu_x}{\lambda_x}; \quad (6.12)$$

$$Pr_{\Gamma} = \frac{c_{\Gamma} \mu_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}}; \quad (6.13)$$

критерия Грасгофа:

$$Gr_x = \frac{g d_x^3 \beta_x \rho_x^2 \Delta t_x}{\mu_x^2}; \quad (6.14)$$

$$Gr_{\Gamma} = \frac{g d_{\Gamma}^3 \beta_{\Gamma} \rho_{\Gamma}^2 \Delta t_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}^2}; \quad (6.15)$$

критерия Пекле:

$$Pe_x = \frac{w_x d_x c_x \rho_x}{\lambda_x}, \quad (6.16)$$

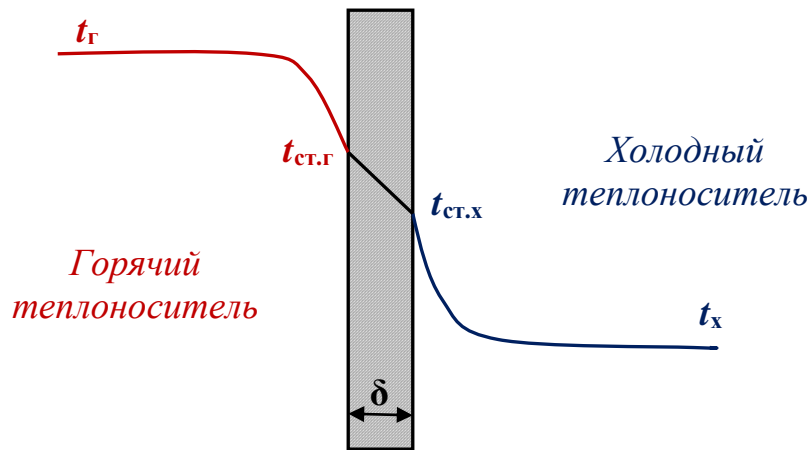
$$Pe_{\Gamma} = \frac{w_{\Gamma} d_{\Gamma} c_{\Gamma} \rho_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}}, \quad (6.17)$$

а также составленных из этих критериев комплексов:  $Gr \cdot Pe$  и  $Pe \cdot d/l$  для холодного и горячего теплоносителя, где  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Па·с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения теплоносителя, 1/К;  $\Delta t$  – перепад температур теплоносителя, К;  $l$  – длина труб теплообменника, м.

В зависимости от полученных значений выбирают вид уравнения для расчета критерия Нуссельта отдельно для холодного  $Nu_x$  и горячего  $Nu_{\Gamma}$  теплоносителя. Схема выбора уравнения представлена в прил. А.

Для дальнейших расчетов необходимо определиться с температурами теплоносителей в процессе теплопереноса (см. рис. 6.3).

Как видно из рисунка, некоторые температуры теплоносителей известны ( $t_{\Gamma}$  и  $t_x$ ), а некоторые неизвестны ( $t_{ст.\Gamma}$  и  $t_{ст.x}$ ). Поэтому дальнейший расчет ведется методом приближений.



**Рис. 6.3. Схема изменения температур теплоносителей в процессе теплопередачи через разделяющую стенку толщиной  $\delta$**

В первом приближении задаются температурой холодного теплоносителя около стенки  $t_{ст.х}$ :

$$t_{ст.х} = t_x + \frac{1}{2} \Delta t_{ср}. \quad (6.18)$$

Зная это параметр, можно рассчитать по выбранному уравнению  $Nu_x$  и затем коэффициент теплоотдачи холодного теплоносителя  $\alpha_x$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \lambda_x}{d_x}. \quad (6.19)$$

Затем определяют удельный тепловой поток, полученный холодным теплоносителем  $q_x$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_x = \alpha_x (t_{ст.х} - t_x), \quad (6.20)$$

который равен удельному потоку тепла, прошедшему через разделяющую стенку ( $q_{ст} = \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} (t_{ст.г} - t_{ст.х})$ ), откуда находят температуру горячего теплоносителя около стенки:

$$t_{ст.г} = t_{ст.х} + \frac{q_{ст} \delta_{ст}}{\lambda_{ст}}, \quad (6.21)$$

где  $\delta_{ст} = 0,002$  м – толщина стенки;  $\lambda_{ст} = 17,5$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности стенки из нержавеющей стали.



Зная температуру горячего теплоносителя около стенки, можно по выбранному уравнению найти критерий Нуссельта для горячего теплоносителя  $Nu_{\Gamma}$ , коэффициент теплопроводности для горячего теплоносителя:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{Nu_{\Gamma} \lambda_{\Gamma}}{d_{\Gamma}} \quad (6.22)$$

и удельный тепловой поток, отданный горячим теплоносителем:

$$q_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma} (t_{\Gamma} - t_{ст.Г}). \quad (6.23)$$

Если температура холодного теплоносителя около стенки была выбрана верно, то удельные тепловые потоки холодного и горячего теплоносителей будут равны ( $q_x = q_{\Gamma}$ ). Допускается расхождение в значениях, не превышающее 15%. Если расхождения в значениях удельных тепловых потоков превышает 15%, расчет продолжают и выполняют второе приближение.

*Во втором приближении* изменяют температуру холодного теплоносителя около стенки на 1...2 градуса:

$$t_{ст.х} = t_{ст.Г} \pm (1...2)^{\circ} \quad (6.24)$$

и повторяют весь расчет первого приближения при измененной температуре. Температуру холодного теплоносителя около стенки увеличивают, если  $q_x < q_{\Gamma}$ , и уменьшают в противном случае ( $q_x > q_{\Gamma}$ ). В результате получают еще два значения удельных тепловых потоков холодного и горячего теплоносителей. Результаты проведения первого и второго приближения можно занести в табл. 6.3.

По данным таблицы следует построить график изменения удельных тепловых потоков в зависимости от температуры холодного теплоносителя около стенки (рис. 6.4).

### 6.3. Значения удельных тепловых потоков, вычисленные в первом и втором приближении

	$t_{ст.х}$	$q_x$	$q_{\Gamma}$
Первое приближение			
Второе приближение			

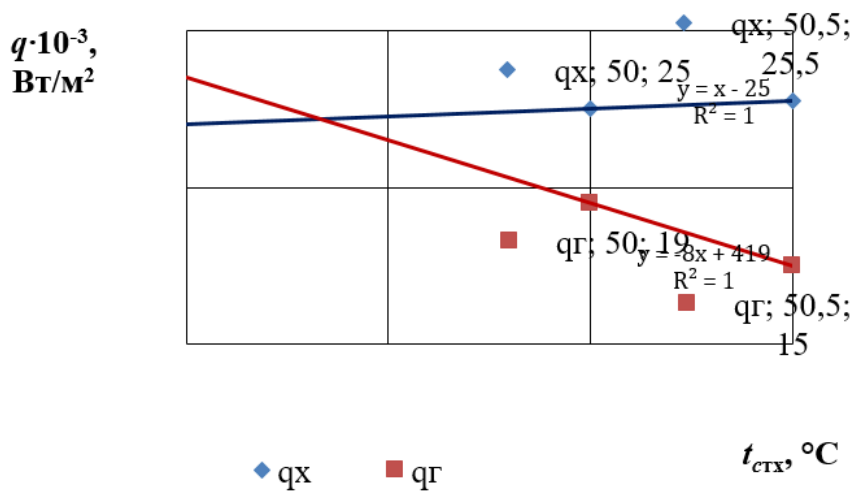


Рис. 6.4. Графическое определение температуры холодного теплоносителя около стенки (искомое  $t_{\text{ст,х}} = 49,3 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Точка пересечения прямых определяет искомую температуру холодного теплоносителя около стенки, при которой удельные тепловые потоки холодного и горячего теплоносителя будут равны.

Определив по графику  $t_{\text{ст,х}}$ , проводят *третье приближение*, из которого находят коэффициенты теплоотдачи холодного  $\alpha_x$  и горячего  $\alpha_g$  теплоносителей.

Вычисляют коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_g}}. \quad (6.25)$$

Рассчитывают требуемую поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ :

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{ср}}}. \quad (6.26)$$

Сравнивая  $F$  с  $F_{\text{ор}}$ , определяют необходимую длину теплообменника.

**Расчет окончен.**

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Чем отличаются рекуперативные теплообменники от регенеративных?
2. Для чего используются градирни?
3. Перечислите преимущества и недостатки пластинчатого теплообменника.
4. Перечислите виды кожухотрубчатых теплообменников.
5. Чем отличаются коэффициент теплоотдачи и коэффициент теплопередачи?
6. В каком теплообменнике можно осуществить нагрев до наибольшей температуры?
7. Какие теплоносители используются для охлаждения?
8. Как рассчитывается высота барометрической трубы?
9. Какой тепловой процесс наиболее энергозатратный: нагрев или испарение? Обоснуйте ответ.
10. Какая величина определяется в результате расчета теплообменника?
11. По какому принципу направляют теплоносители в трубное и межтрубное пространство кожухотрубчатого теплообменника?
12. Какие характеристики влияют на выбор вида уравнения для расчета критерия Нуссельта?
13. Какой режим движения теплоносителей обеспечивает наиболее эффективный процесс теплопередачи?
14. В каких ситуациях применяется аппарат с рубашкой?
15. Перечислите преимущества спиральных теплообменников.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Данное учебное пособие содержит теоретический материал для изучения тепловых процессов и соответствующего аппаратурного оформления.

В учебном пособии представлены классификация тепловых процессов и аппаратов; конструктивные схемы современных видов теплообменного оборудования; описание конструкции и особенностей их эксплуатации.

Представлены некоторые способы расчетов теплообменных аппаратов. В конце каждой главы представлены контрольные вопросы, позволяющие проверить студентам свои знания.

Авторы настоящего учебного пособия надеются, что представленный в нем материал поможет молодым специалистам правильно видеть и понимать проблемы промышленного производства, а знакомство с изложенным материалом окажет студентам практическую помощь, а также повысит уровень их знаний в профессиональной деятельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Плановский, А. Н.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии : учебник для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1987. – 496 с.
2. **Павлов, К. Ф.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-кор. АН СССР П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
3. **Кириллов, П. Л.** Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
4. **Справочник** по теплообменникам : в 2 т. / пер. с англ. ; под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 560 с.
5. **Справочник** по теплообменникам : в 2 т. / пер. с англ. ; под ред. О. Г. Мартыненко и др. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 352 с.
6. **Хаузен, Х.** Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / Х. Хаузен ; пер. с нем. – М. : Энергоиздат, 1981. – 384 с.
7. **Исаченко, В. П.** Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
8. **Фролов, В. Ф.** Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» [Электронный ресурс] / В. Ф. Фролов. – 4-е изд. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2020. – 608 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/97816.html> (дата обращения: 20.01.2022).

9. **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справочное пособие / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

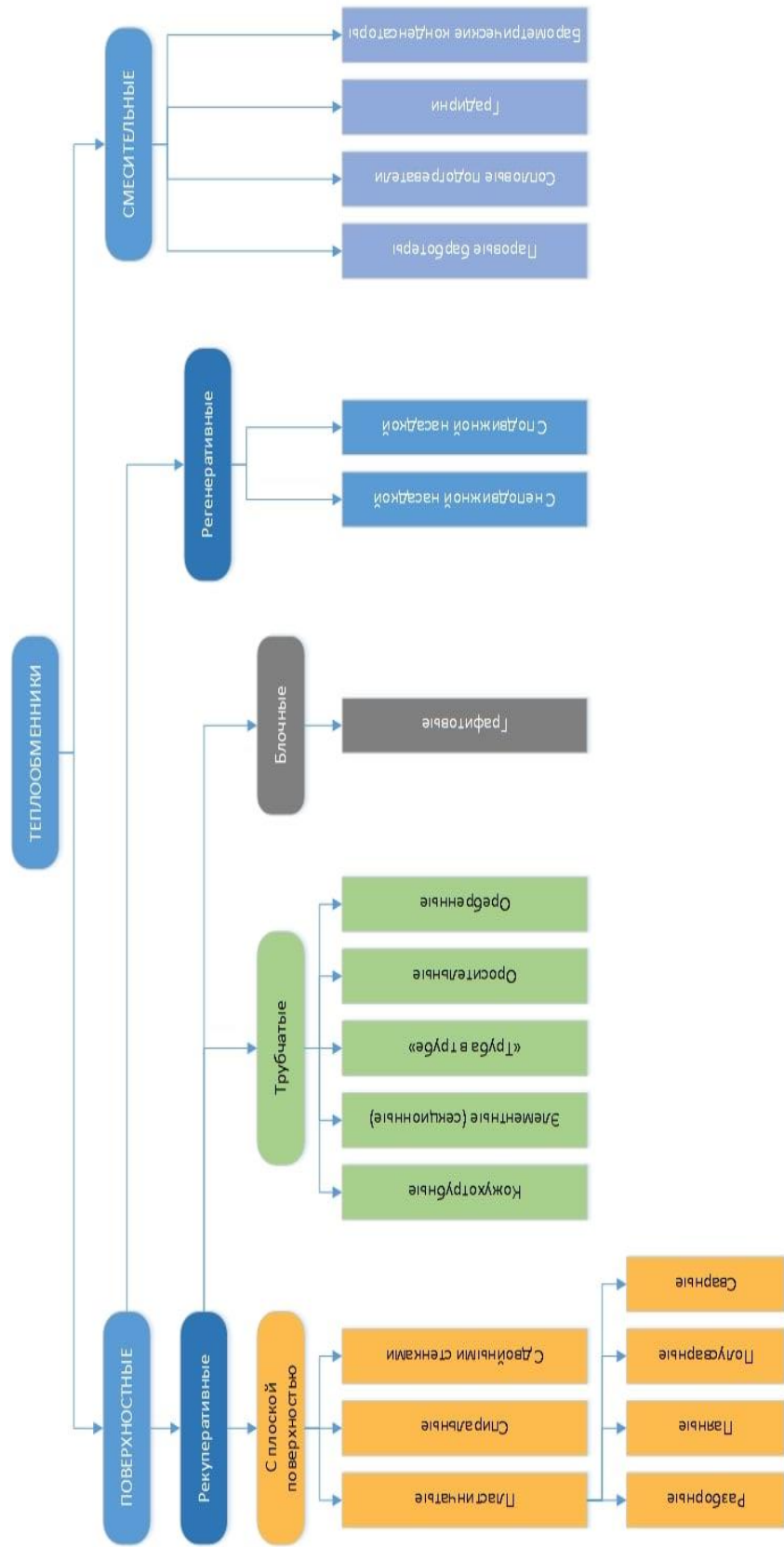
10. **Коваленко, Л. М.** Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л. М. Коваленко, А. Ф. Глушков. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

11. **Промышленные** тепломассообменные процессы и установки / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов и др. ; под ред. А. М. Бакластова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

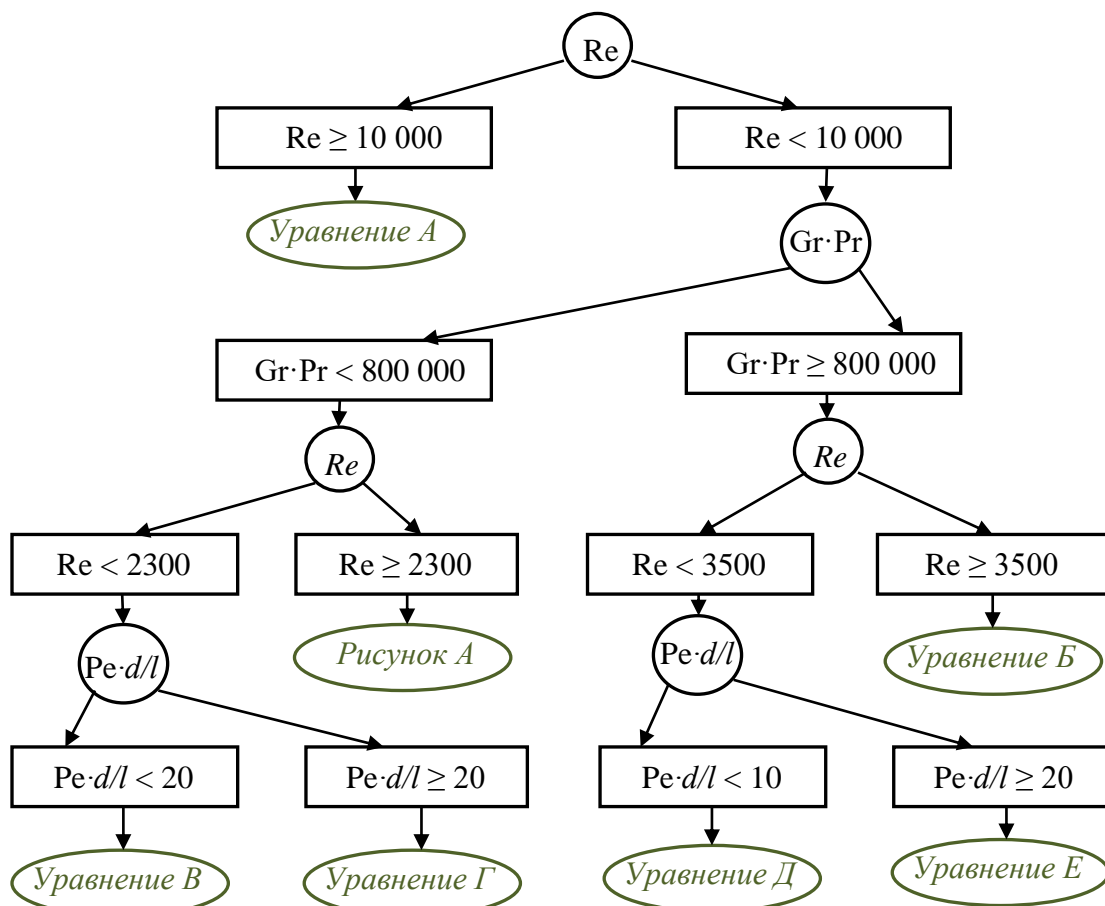
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ



**СХЕМА ВЫБОРА УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КРИТЕРИЯ  
НУССЕЛЬТА ( $Nu$ ) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КРИТЕРИЕВ  
РЕЙНОЛЬДСА ( $Re$ ), ГРАСГОФА ( $Gr$ ) И ПЕКЛЕ ( $Pe$ )**





Уравнения:

$$A: Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25};$$

$$B: Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,25};$$

$$B: Nu \approx 3,66;$$

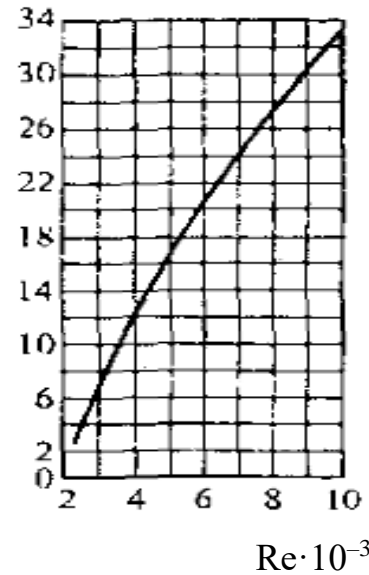
$$Г: Nu = 1,55 \cdot \left( Re \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14};$$

$$Д: Nu = 0,5 \cdot \left( Pe \frac{d}{l} \right);$$

$$E: Nu = 0,8 \cdot \left( Re \frac{d}{l} \right)^{0,4} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}.$$

Рисунок А

$$\frac{Nu}{Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}}$$



**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА  
КОЖУХОТРУБЧАТОГО ЖИДКОСТНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА**

№ п/п	Горячий теплоноситель				Вид холодного теплоносителя
	Вид	$G_T$ , кг/с	$t_{г.н}$ , °С	$t_{г.к}$ , °С	
1	Ацетон	3	56	45	Артезианская вода
2	Бензол	3	80	45	Речная вода
3	Глицерин	3	150	45	Оборотная вода
4	Метиловый спирт	3	64	45	Артезианская вода
5	Серная кислота	3	160	45	Озерная вода
6	Сероуглерод	3	46	45	Оборотная вода
7	Толуол	3	110	45	Артезианская вода
8	Уксусная кислота	3	118	45	Прудовая вода
9	Четыреххлористый углерод	3	76	45	Оборотная вода
10	Этиловый спирт	3	78	45	Артезианская вода
11	Ацетон	4	50	40	Речная вода
12	Бензол	4	70	40	Оборотная вода
13	Глицерин	4	120	40	Артезианская вода
14	Метиловый спирт	4	60	40	Озерная вода
15	Серная кислота	4	130	40	Оборотная вода
16	Сероуглерод	4	45	40	Артезианская вода
17	Толуол	4	100	40	Прудовая вода
18	Уксусная кислота	4	90	40	Оборотная вода
19	Четыреххлористый углерод	4	60	40	Артезианская вода

Продолжение табл.

№ п/п	Горячий теплоноситель			Вид холодного теплоносителя	
	Вид	$G_{г}$ , кг/с	$t_{гн}$ , °С		$t_{гк}$ , °С
20	Этиловый спирт	4	65	40	Речная вода
21	Ацетон	5	45	35	Оборотная вода
22	Бензол	5	60	35	Артезианская вода
23	Глицерин	5	70	35	Озерная вода
24	Метиловый спирт	5	50	35	Оборотная вода
25	Серная кислота	5	90	35	Артезианская вода

# СОДЕРЖАНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИ- РОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	4
2. РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ .....	8
2.1. Жидкостные теплообменники .....	9
2.2. Газовые теплообменники .....	25
2.3. Газожидкостные теплообменники .....	34
2.4. Парожидкостные теплообменники .....	37
3. РЕГЕНЕРАТИВНОЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ .....	39
4. СМЕСИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ .....	58
5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ.....	68
6. РАСЧЕТ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ЖИДКОСТНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА .....	73
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	83
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Классификация теплообменников .....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Схема выбора уравнения для расчета критерия Нуссельта (Nu) в зависимости от критериев Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr) и Пекле (Pe) .....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Исходные данные для расчета кожухотрубчатого жидкостного холодильника .....	89

Учебное электронное издание

АЛЕКСЕЕВА Надежда Вячеславовна  
РОМАНОВА Елена Васильевна  
ШУБИН Роман Александрович

ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова  
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова  
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2575-3



Подписано к использованию 18.05.2023.  
Тираж 50 шт. Заказ № 34

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел./факс (4752) 63-81-08.  
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru