

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Е. А. Дмитриев, Е. П. Моргунова, Р. Б. Комляшёв

**ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Утверждено Редакционным
советом университета в
качестве учебного пособия

Москва
2013

УДК 66.045.1
ББК 37.7:35
Д53

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Института общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова Российской Академии Наук
Н. Н. Кулов

Доктор технических наук, профессор Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева
А. В. Беспалов

Дмитриев Е. А.

Д53 Теплообменные аппараты химических производств: учеб. пособие/
Е. А. Дмитриев, Е. П. Моргунова, Р. Б. Комляшёв. – М.: РХТУ
им. Д. И. Менделеева, 2013. – 88 с.
ISBN 978-5-7237-1131-0

Рассматриваются принципы работы и конструкции основных типов теплообменных аппаратов, применяемых в химической промышленности. Представлены принципиальные схемы и иллюстрации внешнего вида теплообменников. Указаны принцип работы, достоинства и недостатки теплообменных аппаратов. Приведены основные теплоносители, используемые в химической технологии, достоинства, недостатки и области применения теплоносителей.

Предназначено для студентов химико-технологических вузов.

УДК 66.045.1
ББК 34.7:35

ISBN 978-5-7237-1131-0

© Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Проведение многих технологических процессов, осуществляемых в химической промышленности, часто бывает связано с необходимостью подвода или отвода тепловой энергии. Для решения этой задачи применяют различные теплоносители, которые отдают или поглощают тепловую энергию в теплообменных аппаратах (теплообменниках), предназначенных для передачи тепла от одного теплоносителя, нагретого до более высокой температуры, к другому.

Теплоноситель – жидкое или газообразное вещество, применяемое для передачи тепловой энергии.

Теплоносители, отдающие тепловую энергию в теплообменном аппарате, называют **теплагентами**, поглощающие – **хладагентами**. Следует отметить, что деление теплоносителей на теплагенты и хладагенты во многом условно, поскольку один и тот же теплоноситель в одних процессах может выступать в роли теплагента, а в других – хладагента. Примером таких теплоносителей являются **промежуточные теплоносители**, служащие для транспортировки тепловой энергии от её источников (печей, где тепло выделяется при сгорании топлива) к аппаратам, потребляющим тепловую энергию.

В качестве теплоносителей могут служить жидкости, газы и пары, удовлетворяющие ряду требований:

- подходящий для осуществляемого процесса рабочий температурный интервал;
- достаточное теплосодержание – количество тепла выделяемое или поглощаемое теплоносителем в процессе теплообмена, для не меняющих в процессе теплообмена своего фазового состояния теплоносителей определяется теплоёмкостью, для теплоносителей, претерпевающих в процессе теплообмена фазовое превращение, определяется теплотой парообразования или конденсации;
- невысокая вязкость, позволяющая осуществлять транспортировку теплоносителя к теплообменным аппаратам и циркуляцию теплоносителя внутри аппаратов, также вязкость теплоносителя косвенно влияет на коэффициент теплоотдачи;
- отсутствующая или невысокая коррозионная активность;

- безопасность, определяющаяся токсичностью теплоносителя, огнеопасностью и взрывоопасностью, возможностью вызывать термические или криоожоги, а также экологическая безопасность;

- невысокая стоимость теплоносителя и его доступность.

Теплообменник – устройство, в котором осуществляется теплообмен между теплоносителями, имеющими различные температуры.

Теплообменники классифицируются по самым разным признакам: способу теплопередачи, устройству конструкции и способу конфигурации и компоновки поверхности теплопередачи, материалу, из которого изготовлен теплообменник и т.д. Большое разнообразие теплообменного оборудования связано с неоднозначными требованиями, предъявляемыми к теплообменникам, которые зависят от условий их эксплуатации. Следующие требования к теплообменному оборудованию являются основополагающими:

- минимальный расход материалов при изготовлении;
- устойчивость материала к коррозионному действию теплоносителей;
- компактность аппарата при достаточной площади поверхности теплопередачи;
- высокий коэффициент теплопередачи при минимальном гидравлическом сопротивлении;
- надежность и герметичность оборудования;
- легкий доступ к поверхности оборудования для ее очистки от загрязнений;
- доступность деталей и узлов или их унификация.

1. ТЕПЛАГЕНТЫ

Все теплоагенты можно разделить на три класса по их фазовому состоянию, с которым связан также их рабочий температурный интервал (рис. 1). Самые высокие температуры имеют **газообразные теплоагенты**. Это, прежде всего, дымовые газы, образующиеся при сжигании топлива в печах или специальных топках. Кроме того, используют дымовые отработанные газы, которые являются отходами работы различных печей. Вследствие низкой теплоёмкости газообразные теплоносители способны отдать в процессе теплообмена относительно небольшое количество тепловой энергии (менее 300 кДж/кг), и имеют довольно низкий коэффициент теплоотдачи. Всё это, вместе с низкой плотностью газов, приводит к громоздкости теплообменных аппаратов, где в качестве теплоагента выступают газы, и проблемам с транспортировкой этих теплоносителей.

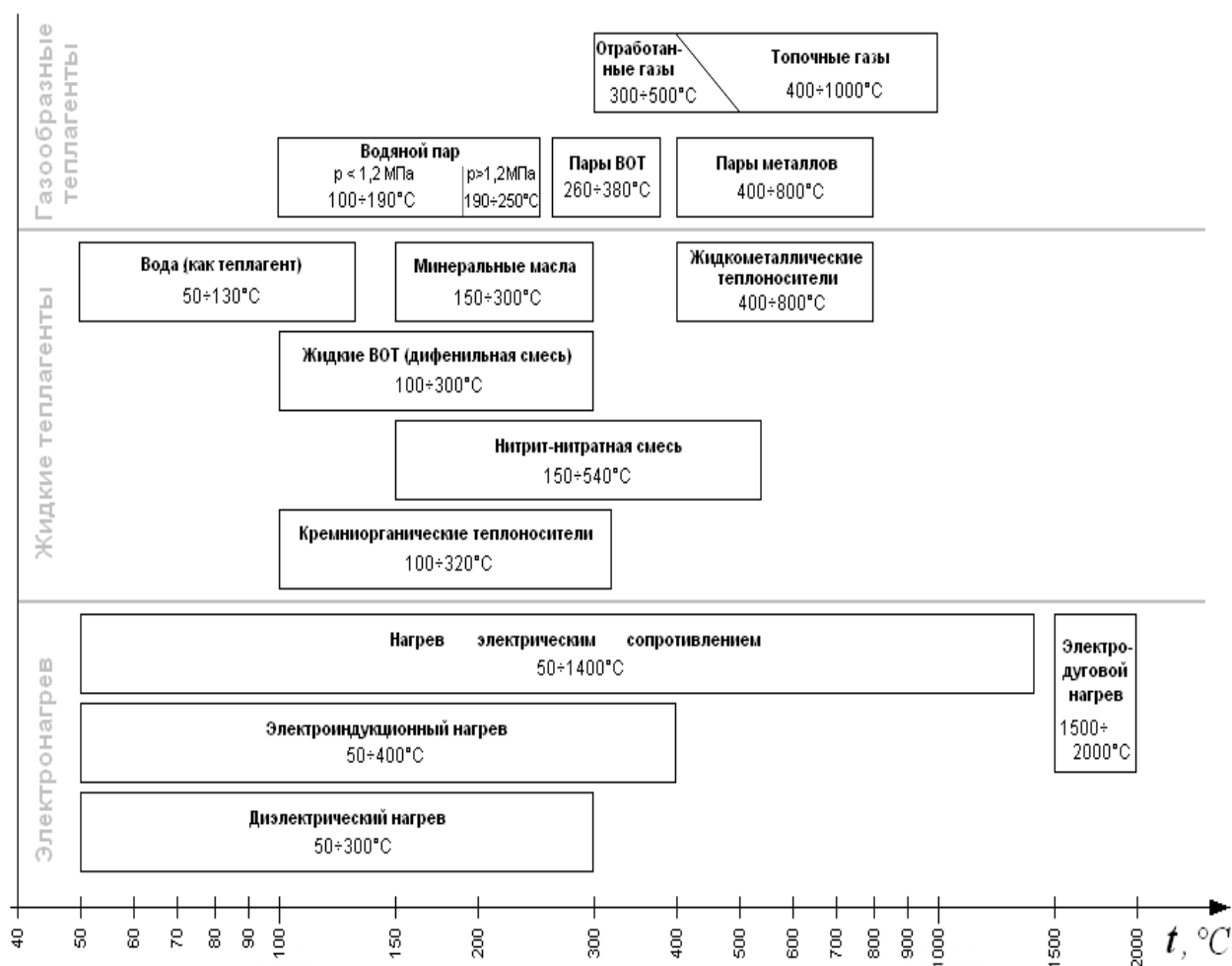


Рис. 1. Рабочие интервалы температур теплоагентов и нагрева электрическим током

Второй класс теплоагентов составляют **пары жидкостей**, их отличие от газов в том, что в процессе теплообмена пары меняют своё фазовое состояние, превращаясь в жидкость – конденсат. Из подобных теплоносителей наиболее распространён водяной пар. Также нашли применение пары высококипящих органических жидкостей. Реже используются пары металлов: лития, калия, кадмия и ртути. Поскольку тепловой эффект фазового перехода достаточно высок, то количество тепловой энергии, получаемой с одного килограмма такого теплоагента в теплообменном аппарате может достигать 2 300 кДж/кг. Следовательно, по этому показателю пары лидируют среди других теплоагентов. Рабочий температурный интервал паров, как теплоагентов, лежит несколько ниже рабочего интервала газообразных теплоагентов. При этом пары обычно играют роль промежуточных теплоносителей, осуществляющих транспортировку к теплообменным аппаратам тепловой энергии, полученной от дымовых газов.

Третий класс теплоагентов – это **жидкие теплоагенты**: вода (в том числе перегретая и находящаяся под давлением); высокотемпературные органические теплоносители (ВОТ), представляющие собой органические жидкости с высокими температурами кипения (этиленгликоль, глицерин, нафталин и его производные, дифенил и его производные) и их смеси (например, дифенильная смесь); минеральные масла; ионные теплоносители, представляющие собой расплавы солей (например, нитрит-нитратная смесь); кремнийорганические жидкости; жидкометаллические теплоносители (ртуть, расплавы щелочных и щелочно-земельных металлов, расплавы свинца, висмута, кадмия, сурьмы, олова). Количество тепловой энергии, выделяемое жидкими теплоагентами в процессе теплообмена обычно несколько ниже, чем у паров, и редко превышает 200–300 кДж/кг. Однако высокая плотность жидкостей, по сравнению с газами и парами, делает жидкие теплоагенты гораздо более экономически выгодными и удобными для использования, чем газообразные теплоагенты, и позволяет конкурировать с парами, поскольку теплообменное оборудование, где используются жидкие теплоагенты, достаточно компактно, а транспортировка жидких теплоагентов сопряжена со значительно меньшими трудностями, чем транспортировка газов и паров.

Отдельно следует отметить процесс нагрева электрическим током. Аппараты для нагрева электрическим током наиболее компактны, рабочий интервал температур довольно широк, а сам процесс нагрева легко контролируется и ре-

гулируется. Всё это позволяет при необходимости использовать электрический ток вместо любого другого теплоагента. Однако стоимость единицы тепловой энергии, полученной при нагреве электрическим током, в несколько раз выше стоимости единицы тепловой энергии, полученной при сжигании топлива. Поэтому на химических предприятиях, где есть возможность получать тепловую энергию от теплостанций, нагрев электрическим током не применяют. Используют его лишь на малотоннажных установках, там, где нет подведённых линий паропроводов. На крупнотоннажных установках зачастую для получения тепловой энергии более рентабельным оказывается установка топki, отапливаемой природным газом, чем нагрев электрическим током.

1.1. Дымовые газы

Получение

Основным источником тепловой энергии на химических предприятиях служат разнообразные печи, где производится сжигание топлива (рис. 2). В качестве топлива могут служить такие распространенные энергоносители, как природный газ, каменный уголь, мазут, торф, а также различное сырьё химических предприятий, которое при переработке подвергают сжиганию или обжигу, например, сера и железный колчедан на серноокислотных заводах.

Продуктом работы печей является тепловая энергия, часть которой выделяется в виде излучения. Эта часть может быть снята и отведена каким-либо теплоносителем непосредственно из радиационной зоны печи. Другая часть тепловой энергии содержится в дымовых газах, представляющих собой смесь продуктов сгорания топлива с воздухом, который подаётся в печь обычно в избытке. Эта часть тепловой энергии может быть снята и отведена в конвективной зоне печи, либо направлена вместе с дымовыми газами к потребляющим тепловую энергию аппаратам.

Транспортировка дымовых газов сопряжена с рядом трудностей. Низкая плотность и малая теплоёмкость газов приводит к значительным диаметрам труб газопроводов, необходимым для их транспортировки. Обеспечить тепловую изоляцию таких широких труб сложно, а недостаточная изоляция при довольно значительных температурах дымовых газов приводит к большим тепло-

вым потерям и быстрому остыванию газов. Поэтому потребляющие тепловую энергию дымовых газов аппараты следует размещать рядом с печами.

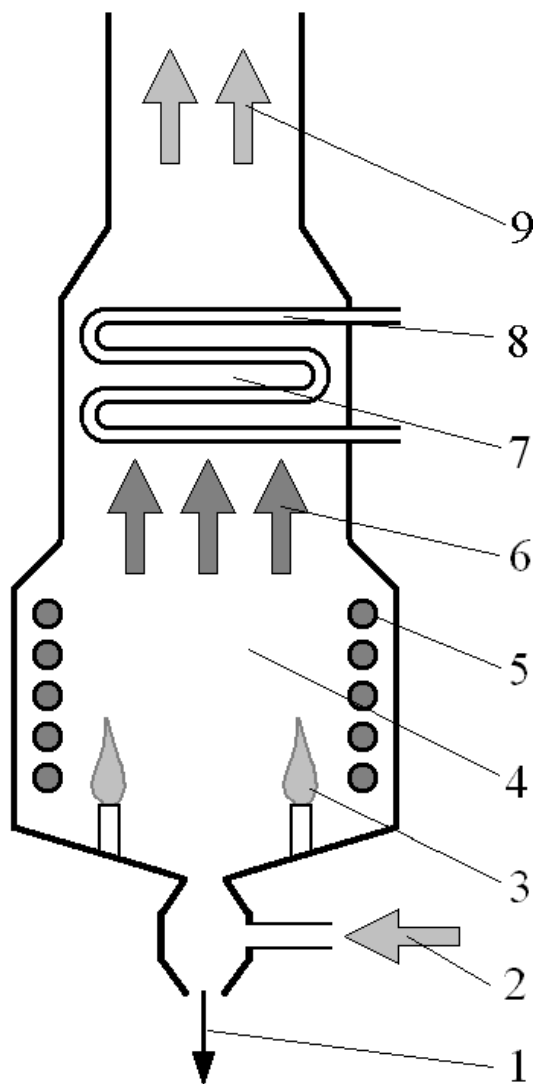


Рис. 2. Схема трубчатой печи:
1 – удаление шлака; 2 – воздух; 3 – факел сгорающего топлива;
4 – радиационная зона печи; 5 – трубчатка радиационной зоны печи;
6 – дымовые газы; 7 – конвективная зона печи;
8 – трубчатка конвективной зоны печи; 9 – отработанные газы

Также возможно получение дымовых газов непосредственно рядом с потребляющим их аппаратом. Для этого используют небольшие топки (рис. 3), где в качестве топлива используют обычно природный газ. Дымовые газы в этом случае перед подачей в теплообменный аппарат обычно разбавляют воздухом до необходимой температуры.

Не вся тепловая энергия дымовых газов может быть отведена непосредственно из печи. Отходящие из печи газы имеют температуру $300\div 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, на-

зываются отработанными дымовыми газами, и также при необходимости могут быть использованы в качестве теплоагента. Поскольку температура этих газов ниже, а сами они являются отходами, требования к их транспортировке менее жёсткие, и их уже можно транспортировать на некоторые расстояния.

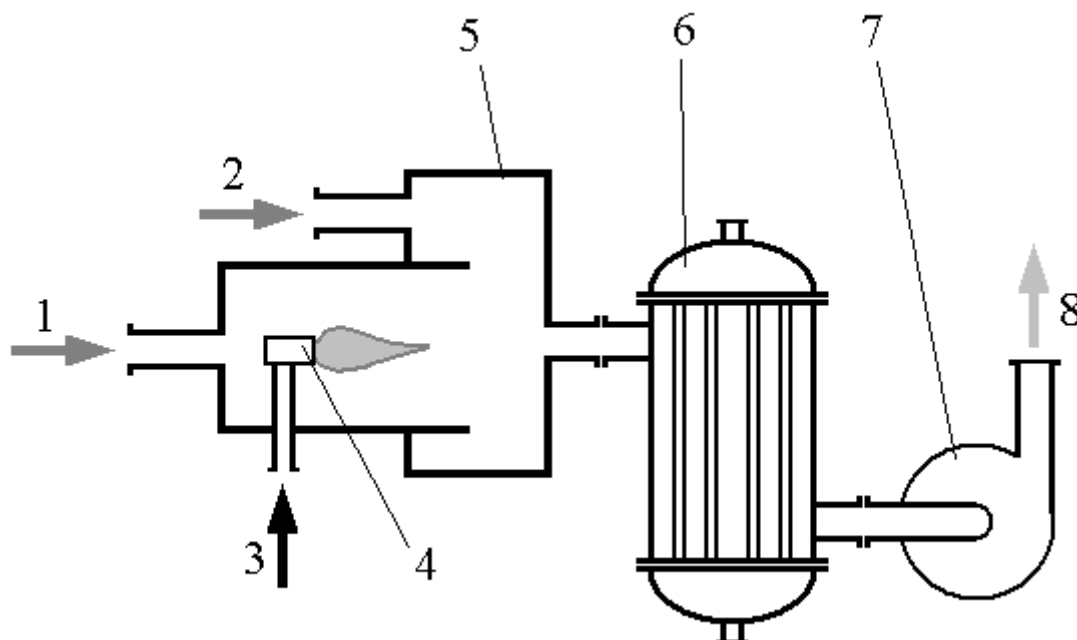


Рис. 3. Схема обогрева топочными газами:

- 1 – подача воздуха в камеру сгорания; 2 – подача воздуха для разбавления дымовых газов;
 3 – подача топлива; 4 – горелка; 5 – камера смешения; 6 – теплообменный аппарат;
 7 – дымовой насос; 8 – отвод отработанных газов

Достоинства дымовых газов как теплоагента:

1) Наиболее высокий из всех теплоагентов рабочий интервал температур (для печных и топочных дымовых газов $400 \div 1\ 000\ ^\circ\text{C}$, для отработанных газов $300 \div 500\ ^\circ\text{C}$).

2) Относительно низкая стоимость, благодаря получению непосредственно сжиганием топлива.

Недостатки дымовых газов как теплоагента:

1) Малая удельная объёмная теплоёмкость (около $1,5\ \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$), что вызывает необходимость пропускания через аппараты больших объёмов газов, обуславливает громоздкость аппаратов и вызывает трудности с транспортировкой газов к аппаратам.

2) Низкие коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке (менее $50\ \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$), что приводит к необходимости создания в аппаратах больших

поверхностей теплоотдачи (например, путём оребрения со стороны газов) и обуславливает громоздкость аппаратов.

3) Неравномерность нагрева и сложность регулирования нагрева из-за значительного изменения температуры дымовых газов в процессе теплообмена (для наиболее полного использования тепла дымовые газы в процессе теплообмена охлаждаются на несколько сотен градусов, следовательно, части аппарата, контактирующие со свежими дымовыми газами, будут нагреты гораздо сильнее, чем части, контактирующие с отходящими газами).

4) Загрязнение нагреваемых веществ продуктами сгорания и сажей при непосредственном (остром) контакте дымовых газов с нагреваемыми веществами или загрязнение поверхности теплопередачи при контакте через стенку.

5) Коррозия стенок аппарата вследствие высоких температур и содержания коррозионно-активных веществ (воды, остатков кислорода, оксидов серы и азота) в дымовых газах.

6) Экологическая опасность (загрязнение атмосферы продуктами сгорания топлива: оксидами азота, серы и фосфора, а также выброс в атмосферу парниковых газов).

Область применения

Дымовые газы, получаемые при сжигании твёрдого, жидкого или газообразного топлива – основной источник тепловой энергии на химических предприятиях. Другие теплоагенты, являющиеся промежуточными теплоносителями (такие как водяной пар, горячая вода, ВОТ и др.), получают тепловую энергию от дымовых газов. Контакт между дымовыми газами и промежуточным теплоносителем осуществляют в аппаратах, аналогичных изображённой на рис. 2 трубчатой печи.

Дымовые газы часто используют как теплоагент в регенеративных теплообменниках. Так воздух, подаваемый в доменную печь, предварительно нагревают в регенеративном теплообменнике (рис. 52), для нагрева которого используются отводимые из доменной печи дымовые газы.

Дымовые газы также используются как теплоагент при непосредственном контакте с нагреваемыми веществами (остром нагреве), например, в процессе конвективной сушки, где дымовые газы играют роль сушильного агента.

Температуру топочных газов регулируют частичной рециркуляцией отработанных газов. Возвращая дымовым насосом или эжектором часть отработанных газов и смешивая их с газами, полученными в топке, снижают температуру газов и одновременно увеличивают объём газов, обогревающих теплообменные аппараты. Увеличение объёма газов приводит к возрастанию их скорости, что влечёт за собой увеличение коэффициента теплоотдачи от газа к стенке теплообменного аппарата. Также для снижения температуры газом можно произвести их разбавление воздухом.

1.2. Водяной пар

Получение

Из всех парогенерирующих аппаратов наибольшее промышленное значение в химической технологии имеют следующие: паровые котлы для получения насыщенного пара, паровые котлы энергетических установок для получения перегретого пара, паровые котлы-утилизаторы, выпарные установки. Другие аппараты, генерирующие пар, такие как электрические паровые котлы, в химической промышленности применяются мало вследствие малотоннажности или высокой стоимости получаемого пара.

Паровые котлы для получения насыщенного пара предназначены для снабжения насыщенным водяным паром химического предприятия. Различают дымотрубные котлы, где по трубам движутся дымовые газы, а вода кипит в межтрубном пространстве, и паротрубные котлы, где кипение воды происходит в трубах. Паротрубные котлы используются чаще, поскольку более удобны в обслуживании. В качестве топлива в паровых котлах используют природный газ или мазут, реже каменный уголь или торф. Основным продуктом работы паровых котлов является насыщенный пар, побочным продуктом может быть горячая вода. Поскольку кипение в котлах с точки зрения теплоотдачи выгоднее проводить при повышенном давлении (большая плотность пара при повышенном давлении позволяет достичь большей массовой доли испарённой воды в трубах котла, тем самым снизив число циркуляций испаряемой воды), то получаемый пар, имеющий давление 2÷4 МПа (20÷40 бар), необходимо дросселировать до необходимого на химическом предприятии давления греющего пара 0,5÷1 МПа. Процесс дросселирования пара невыгоден с энергетической точки

зрения, целесообразнее использовать избыточное давление пара, пропустив пар через турбину, превратив тем самым часть энергии пара в электроэнергию.

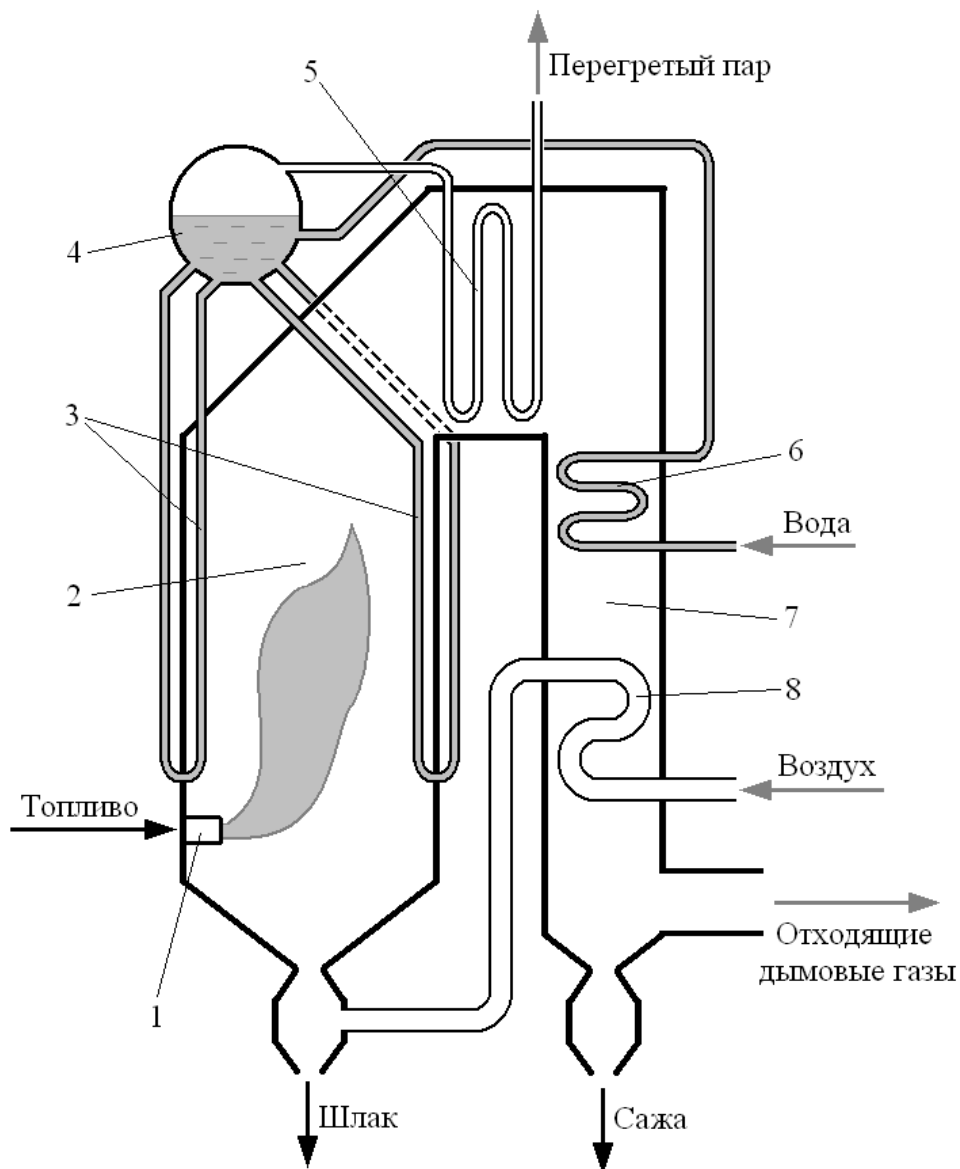


Рис. 4. Схема П-образного паротрубного котла:

1 – горелка; 2 – топочная камера; 3 – трубочка радиационной зоны (топочные экраны); 4 – барабан (сепаратор водопаровой смеси); 5 – радиационно-конвективный пароперегреватель; 6 – водяной экономайзер (подогреватель); 7 – конвективная шахта; 8 – воздухоподогреватель

Паровые котлы энергетических установок снабжают перегретым паром паровые турбины, вращающие электрогенераторы. Различают дымотрубные и паротрубные котлы энергетических установок, в нашей стране большинство энергетических установок используют паротрубные котлы (рис. 4). В качестве топлива используют природный газ, мазут или каменный уголь. Основным продуктом энергетической установки – электрическая энергия, побочными продуктами являются: отработанный пар под давлением $0,2 \div 0,3$ МПа (получаемый на

выходе из турбин с противодавлением), отобранный пар под давлением $0,6\div 0,7$ МПа (получаемый от турбин с промежуточным отбором пара), горячая вода. Использование избыточного давления пара для выработки электроэнергии более рентабельно, чем его дросселирование.

Котлы-утилизаторы используют на химических предприятиях для поглощения и переработки тепловой энергии различных экзотермических процессов, когда требуется снижение температуры. Например, в сернокислотном производстве при сжигании серы или обжиге железного колчедана получаемый диоксид серы имеет температуру более 1000 °С, для дальнейшей переработки необходимо снизить его температуру до $350\div 400$ °С, с этой целью после печи обжига устанавливают котёл-утилизатор.

Выпарные установки, используемые для концентрирования водных растворов солей, в качестве побочного продукта своей работы дают экстра-пар. Обычно этот пар имеет невысокое давление, близкое к атмосферному, что ограничивает возможности его использования. Однако этот пар можно компримировать – пропустить через компрессор, тем самым повысив его давление. Даже с учётом того, что компримирование пара сопряжено с затратами электроэнергии на работу компрессора, использование компримированного экстра-пара достаточно выгодно. Многие выпарные установки обогреваются собственным компримированным экстра-паром.

Высокие требования при получении пара предъявляются к качеству испаряемой воды. Подаваемая в парогенераторы вода должна быть очищена не только от механических примесей, но и от солей жёсткости – гидрокарбонатов кальция и магния, которые при нагревании способны выпадать на стенках труб в виде накипи. Образующаяся накипь не только ухудшает теплопередачу в аппарате, но и способна в конечном итоге привести к аварии – разрыву паром забитой накипью трубы. Подготовка воды для дальнейшего получения из неё пара – процесс сложный, что существенно сказывается на стоимости получаемого пара.

Достоинства водяного пара как теплоагента:

1) Высокий коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке ($5\ 000\div 15\ 000$ Вт/(м²·К)).

2) Большое количество тепла, выделяемого при конденсации пара (2 000÷2 300 кДж/кг).

3) Возможность транспортировки на значительные расстояния (при этом пар должен быть перегрет на 10÷20 К).

4) Равномерность обогрева, поскольку температура конденсации пара постоянна по всей длине аппарата.

5) Возможность регулирования температуры пара путём изменения давления.

6) Водяной пар нетоксичен, экологически безопасен, негорюч и невзрывоопасен.

Недостатки водяного пара как теплоносителя:

1) Значительное возрастание давления с увеличением температуры. Вследствие чего использование пара высоких температур возможно только на оборудовании, рассчитанном на высокие давления, что ограничивает применение водяного пара.

Область применения

Водяной пар является наиболее распространённым теплоносителем в химической промышленности. Рабочий интервал температур насыщенного водяного пара ограничен 250 °С, однако на практике насыщенный водяной пар используют при 100÷190 °С, поскольку более высокие температуры пара соответствуют высоким давлениям. Использование пара с давлением свыше 1,2 МПа, как правило, экономически нецелесообразно вследствие усложнения аппаратного оформления процесса.

Помимо насыщенного пара часто встречается перегретый пар, получаемый путём дополнительного нагрева пара выше температуры насыщения. Перегрев пара производят для сообщения ему дополнительной энергии, что целесообразно при использовании пара для вращения паровых турбин. Применение перегретого пара как теплоносителя вместо насыщенного пара не даёт особых преимуществ, так как основную часть тепловой энергии пар выделит, только начав конденсироваться, что произойдёт при охлаждении пара до температуры насыщения. Тепловая энергия, выделившаяся в ходе охлаждения перегретого пара и превращения его в насыщенный пар, относительно мала вследствие низкой те-

плоёмкости пара. Следовательно, использование перегретого пара не даст преимуществ ни по тепловой энергии, ни по температуре. Однако перегрев пара целесообразно производить, если требуется его транспортировка. Перегрев пара на $10\div 20$ К позволяет избежать конденсации пара в паропроводах, поскольку возможные тепловые потери будут компенсированы перегревом.

Различают «острый» и «глухой» нагрев водяным паром. Острый нагрев паром применяют в тех случаях, когда допустимо смешение нагреваемой среды с паровым конденсатом. Этот способ нагрева отличается простотой теплообменных аппаратов (рис. 5) и позволяет лучше использовать тепловую энергию пара, так как паровой конденсат смешивается с нагреваемой жидкостью, в результате чего их температуры выравниваются. Кроме того, подавая пар в нагреваемую жидкость под давлением, можно перемешивать жидкость, используя сопло и диффузор (рис. 5, б). Использование струйного насоса-эжектора, где в качестве рабочей среды используется пар, а перекачиваемой средой является вода, позволяет нагнетать воду под давлением в паровой котёл, одновременно её подогревая.

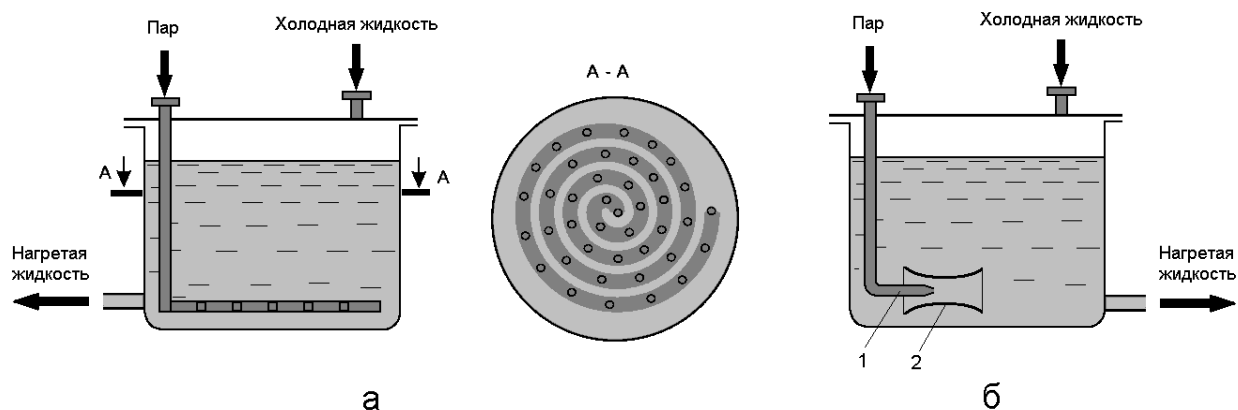


Рис. 5. Схема остrego нагрева жидкости водяным паром:
 а – паровой барботер; б – бесшумный сопловой подогреватель;
 1 – сопло; 2 – смешивающий диффузор

Острый нагрев водяным паром встречается в химической технологии редко, поскольку смешение нагреваемой жидкости и парового конденсата обычно недопустимо. Значительно чаще нагрев осуществляют через стенку – глухой нагрев паром (рис. 6). При этом способе нагрева пар, соприкасаясь с более холодной стенкой, конденсируется на ней, и конденсат стекает по стенке в виде плёнки. Пар всегда вводят в верхнюю часть аппарата, а образующийся конденсат самотёком отводят из его нижней части.

При глухом нагреве паром необходимо, чтобы пар полностью сконденсировался в аппарате. Совершенно недопустима работа теплообменного аппарата с «пролётным» паром, т. е. при неполной конденсации пара, когда из аппарата отводится смесь пара и конденсата. Для предотвращения непроизводительного расхода пара в результате его ухода с конденсатом используют специальные устройства – **конденсатоотводчики**, которые препятствуют уходу из аппарата пара, при этом своевременно отводя конденсат.

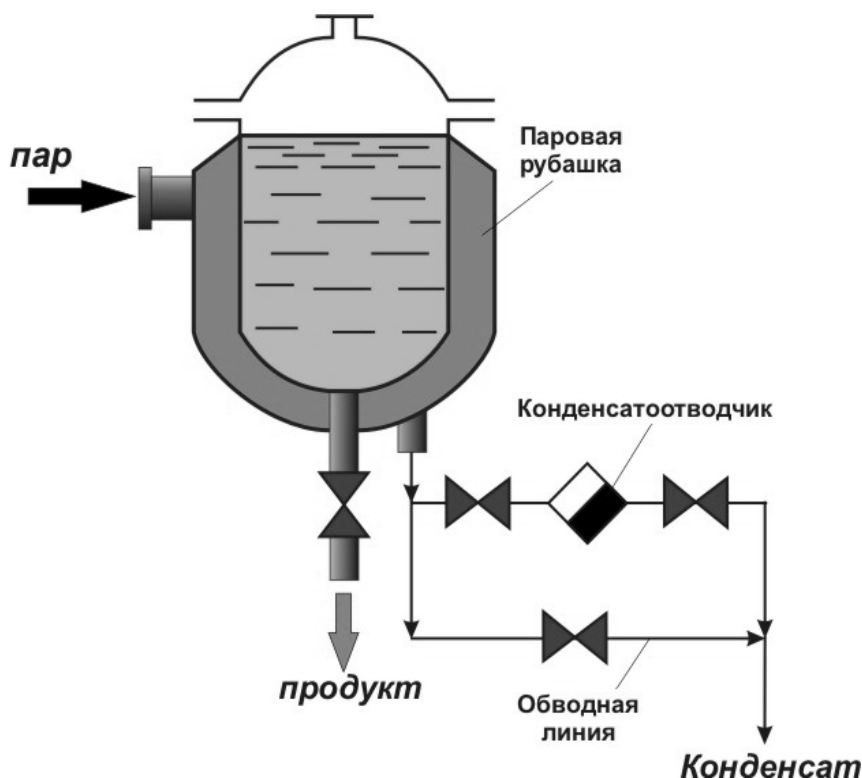


Рис. 6. Схема размещения конденсатоотводчика на аппарате при глухом обогреве паром

Различают клапанные конденсатоотводчики периодического действия и бесклапанные конденсатоотводчики непрерывного действия. В зависимости от принципа работы клапанные конденсатоотводчики можно разделить на три группы: механические (поплавковые), термостатические и термодинамические. Принцип работы механических конденсатоотводчиков основан на использовании разницы в плотностях пара и конденсата. При поступлении конденсата в корпус конденсатоотводчика поплавков всплывает, поднимая клапан для отвода конденсата. После удаления конденсата поплавков опускается и клапан закрывает выходное отверстие. Существуют следующие их разновидности: поплавко-

вый со сферическим закрытым поплавком (рис. 7), поплавковый со сферическим открытым поплавком, поплавковый колокольного типа (с открытым стаканом) (рис. 8).

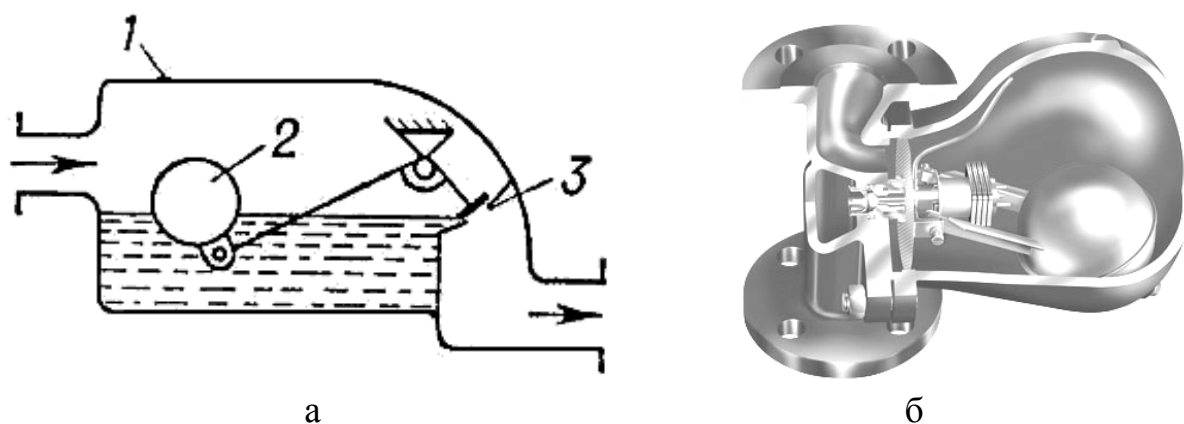


Рис. 7. Схема устройства (а) и вид в разрезе (б) механического конденсатоотводчика со сферическим закрытым поплавком:
1 – корпус; 2 – поплавок; 3 – клапан

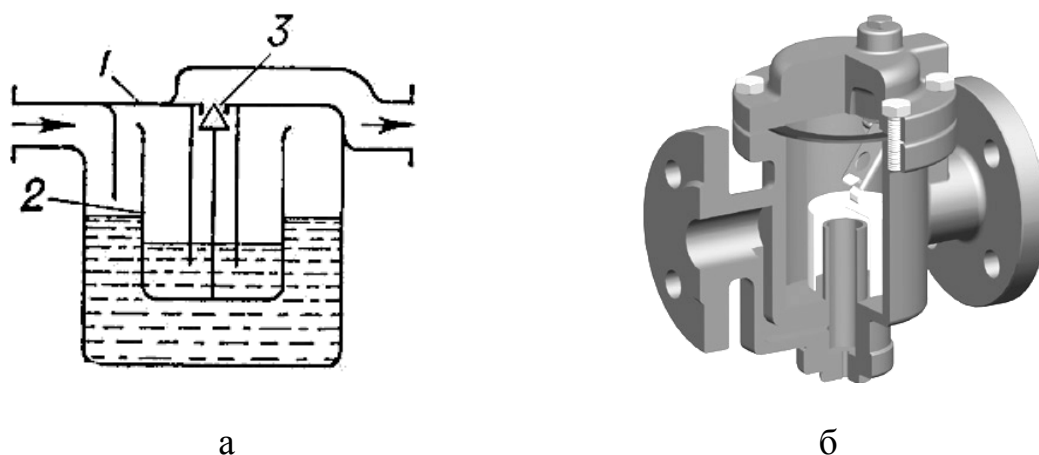


Рис. 8. Схема устройства механического конденсатоотводчика с открытым стаканом (а) и вид в разрезе механического конденсатоотводчика с перевёрнутым открытым стаканом (б):
1 – корпус; 2 – стакан; 3 – клапан

Принцип работы термостатических конденсатоотводчиков основан на использовании расширения тел от нагревания и различии температур пара и конденсата. При поступлении в конденсатоотводчик пара, имеющего более высокую температуру, чем конденсат, рабочее тело конденсатоотводчика расширяется и клапан закрывается. Существуют следующие разновидности термостатических конденсатоотводчиков: капсульные конденсатоотводчики, где рабочим телом является капсула, заполненная спиртовой смесью (рис. 9, а); конденсатоотводчики с биметаллическими пластинами, где рабочим телом является

пластина, изгибающаяся при нагревании вследствие того, что металлы, из которых она изготовлена, имеют разные коэффициенты температурного расширения; сифонные конденсатоотводчики, где рабочим телом является сифон – упругая многослойная гофрированная оболочка (рис. 9, б).

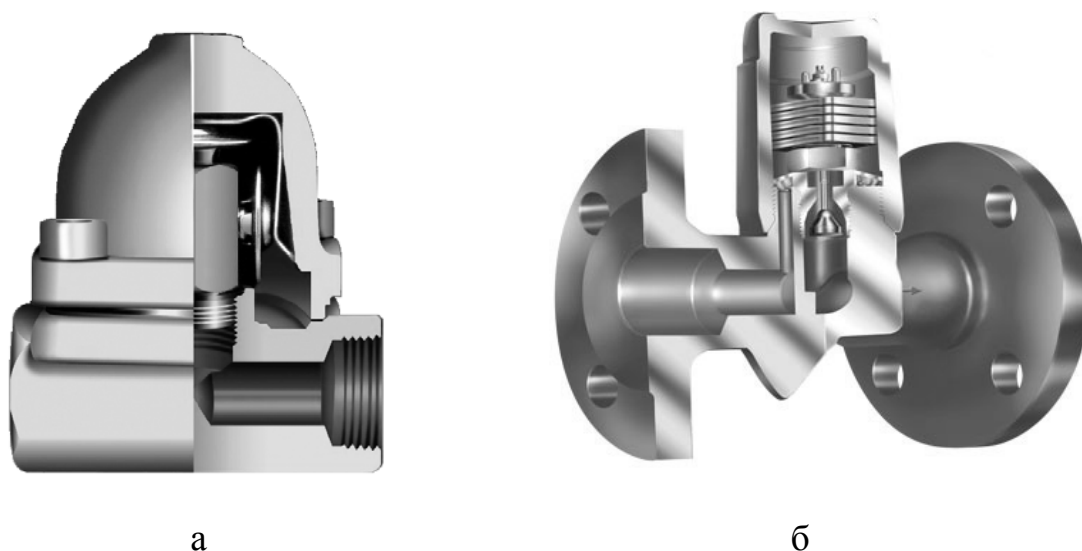


Рис. 9. Термостатические конденсатоотводчики:

а – капсульный конденсатоотводчик; б – сифонный конденсатоотводчик

Принцип действия термодинамических конденсатоотводчиков (рис. 10) основан на использовании кинетической энергии среды разной плотности, проходящей через него. Конденсат поднимает тарелку и проходит к выходному отверстию. Пар, двигаясь в зазоре между тарелкой и корпусом, имеет большую скорость, чем конденсат, вследствие чего давление под тарелкой понижается. Из-за разности давлений под и над тарелкой, она прижимается к уплотнительным кольцам, блокируя проход пара.

Могут также использоваться различные комбинированные конденсатоотводчики, например, дифференциальные. В дифференциальном конденсатоотводчике, сочетающем в себе особенности термостатических и термодинамических конденсатоотводчиков, при переохлаждении конденсата происходит открытие клапана за счёт сжатия рабочего тела. Закрытие клапана происходит за счёт термодинамического процесса «вскипания» конденсата в области локального снижения давления, когда температура конденсата приближается к температуре насыщения. Дифференциальный конденсатоотводчик отличается чувствительностью, что предотвращает потери пара, а также позволяет регулировать

температуру отводимого конденсата путём перенастройки регулятора на определённое переохлаждение.

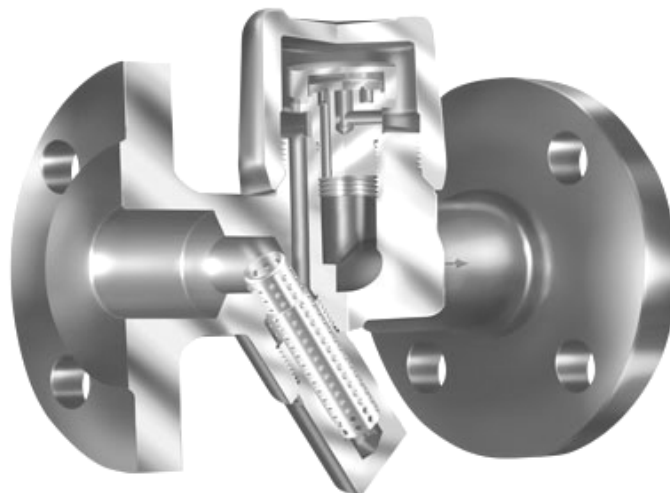


Рис. 10. Термодинамический конденсатоотводчик

Бесклапанные конденсатоотводчики непрерывного действия препятствуют прохождению пара с помощью гидрозатвора или гидравлического сопротивления. Гидравлический затвор образуется либо столбом конденсата в гидравлических колонках (конденсатоотводчик с гидрозатвором), либо одним или несколькими соплами (сопловые конденсатоотводчики), либо лабиринтом, создающим гидравлическое сопротивление прохождению пара, но не препятствующим прохождению конденсата (лабиринтные конденсатоотводчики). В случае отвода конденсата посредством гидравлического сопротивления применяют подпорные шайбы.

При нагревании насыщенным водяным паром в паровое пространство аппарата поступают содержащиеся в паре неконденсирующиеся газы (воздух, углекислый газ и др.). Конденсатоотводчики не пропускают эти газы, в результате чего газы накапливаются. Присутствие неконденсирующихся газов приводит к значительному снижению коэффициента теплоотдачи от пара к стенке, поэтому их следует удалять, периодически продувая аппарат свежим паром путём открытия вентиля на обводной линии конденсатоотводчика.

1.3. Пары высокотемпературных органических теплоносителей

Получение и область применения

Для нагревания выше 190 °С без существенного усложнения оборудования вместо водяного пара могут быть использованы пары высокотемпературных органических жидкостей (ВОТ). В качестве ВОТ могут быть использованы любые термостойкие высококипящие органические жидкости, удовлетворяющие требованиям безопасности, такие как этиленгликоль, глицерин, нафталин и его производные, продукты хлорирования дифенила и полифенолов, а также смеси этих веществ. Широкое распространение получила дифенильная смесь – эвтектическая и азеотропная бинарная смесь, содержащая 26,5 % дифенила и 73,5 % дифенилового эфира, кипящая при атмосферном давлении при 258 °С и разлагающаяся при 400 °С. Таким образом, при 260 °С парами дифенильной смеси можно проводить нагрев при атмосферном давлении, в то время как водяной пар при такой температуре будет иметь давление 4,6 МПа.

На рис. 11 показана простейшая схема установки нагревания парами ВОТ. Испаритель 1 представляет собой топочную печь, обогреваемую дымовыми газами, образующимися при сгорании топлива. Таким образом, ВОТ в представленной схеме играет роль промежуточного теплоносителя.

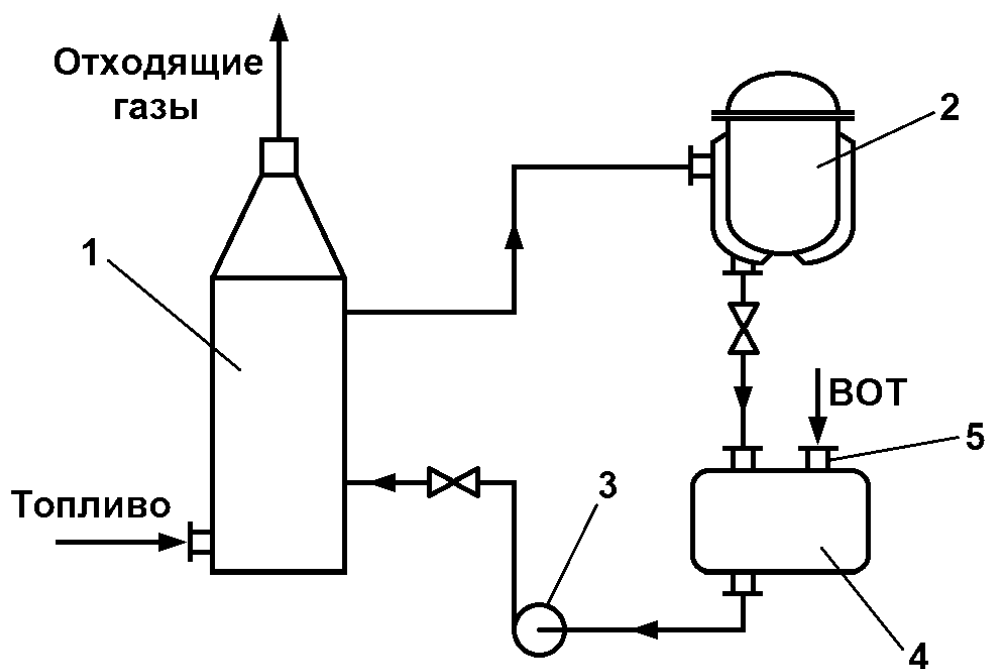


Рис. 11. Схема обогрева аппарата периодического действия парами ВОТ:
1 – испаритель; 2 – аппарат с паровой рубашкой; 3 – насос; 4 – резервуар; 5 – штуцер для подпитки

Достоинства паров дифенильной смеси как теплоносителя:

1) Возможность нагрева до высоких температур без существенного повышения давления (рабочий интервал температур $260 \div 380$ °С, при этом давление паров не превышает 1 МПа).

2) Низкая горючесть и взрывобезопасность паров (в случае просачивания паров в топочное пространство происходит их воспламенение, но пары горят слабо, образуя шлак, который часто герметизирует имевшуюся щель).

3) Нетоксичность (вдыхание паров не опасно, однако длительное пребывание в атмосфере паров дифенильной смеси вызывает раздражение слизистых оболочек и иногда головные боли).

4) Коррозионно-неактивна по отношению к наиболее распространенным конструкционным материалам.

Недостатки паров дифенильной смеси как теплоносителя:

1) Коэффициент теплоотдачи при конденсации паров дифенильной смеси на порядок ниже коэффициента теплоотдачи при конденсации пара (около $1400 \div 1750$ Вт/(м²·К)).

2) Теплота конденсации дифенильной смеси в 4–5 раз меньше, чем для водяного пара, однако вследствие большей плотности паров дифенильной смеси количество тепла, выделяющееся на единицу объема, для паров дифенильной смеси и водяного пара примерно одинаково.

3) Стоимость дифенильной смеси существенно выше стоимости водяного пара.

4) Быстрое разложение дифенильной смеси при нагревании выше 400°С. Если точное регулирование температуры в испарителе невозможно и дифенильная смесь может частично разлагаться, то необходимо предусмотреть в схеме аппарат для удаления продуктов разложения.

1.4. Пары металлов

Получение и область применения

На практике находят применение высокотемпературные теплоносители не подверженные разложению при высоких температурах – это металлические высокотемпературные теплоносители (МВТ). В парообразном состоянии в ка-

честве теплоносителей могут быть использованы литий, кадмий, калий и ртуть. С их помощью можно обеспечить нагрев выше 400 °С при относительно низких давлениях. Таким образом, пары МВТ, как теплоноситель, составляют конкуренцию дымовым газам, позволяя при этом достичь более равномерного и регулируемого нагрева.

Достоинства паров МВТ как теплоносителя:

1) Возможность нагрева до высоких температур без существенного повышения давления (давление насыщенного пара ртути при 400 °С составляет 0,2 МПа, в то время как пары дифенильной смеси при этой температуре имеют давление около 1 МПа, а водяной пар находится в надкритическом состоянии при давлении более 23 МПа).

2) Термическая стойкость (в отличие от ВОТ пары металлов не подвержены разложению).

3) Равномерный и регулируемый нагрев (в отличие от нагрева топочными газами).

Недостатки паров МВТ как теплоносителя:

1) Высокая токсичность паров металлов (предельно допустимое содержание паров ртути в воздухе производственных помещений 0,01 мг/м³).

2) Более низкий, чем у водяного пара и паров ВОТ, коэффициент теплоотдачи (при конденсации паров ртути коэффициент теплоотдачи 600 Вт/(м²·К)).

3) Застывание некоторых металлов в трубопроводах охлаждении до комнатной температуры.

1.5. Вода как теплоноситель

Получение и область применения

Горячая вода является побочным продуктом работы котлов для получения водяного пара. Также может быть использован конденсат от выпарных установок, теплообменников подогревателей и других аппаратов, где происходит конденсация водяного пара без охлаждения конденсата. При отсутствии таких источников горячей воды, она может быть получена в специально предназначенных для этого водогрейных котлах (рис. 12). Для получения горячей воды иногда используют теплообменники-бойлеры, обогреваемые водяным паром.

Однако, поскольку водяной пар – более предпочтительный теплогент, то получение с его помощью горячей воды редко бывает целесообразно.

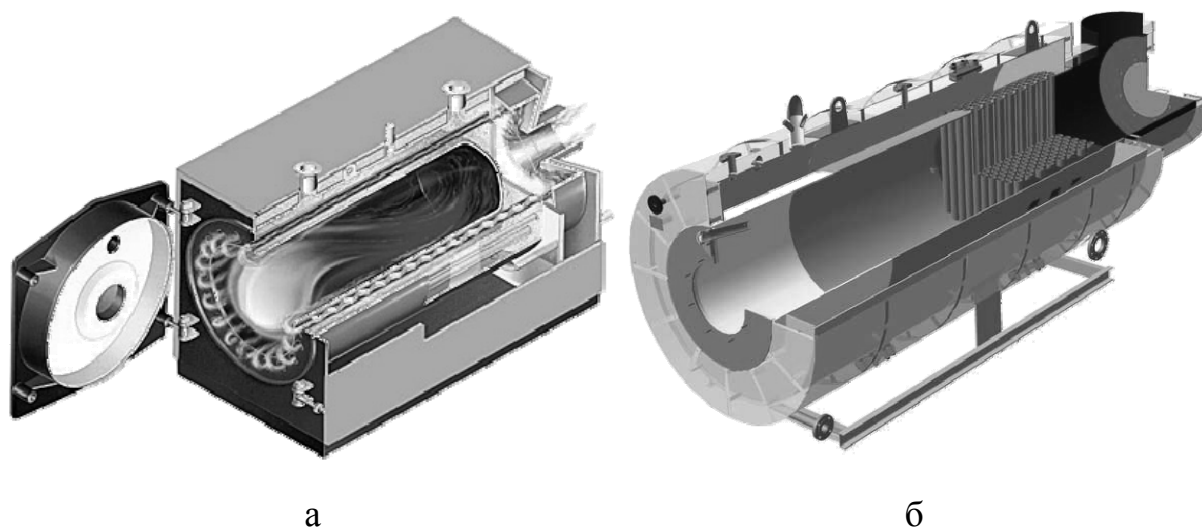


Рис. 12. Водогрейные котлы:
а – дымотрубный; б – водотрубный

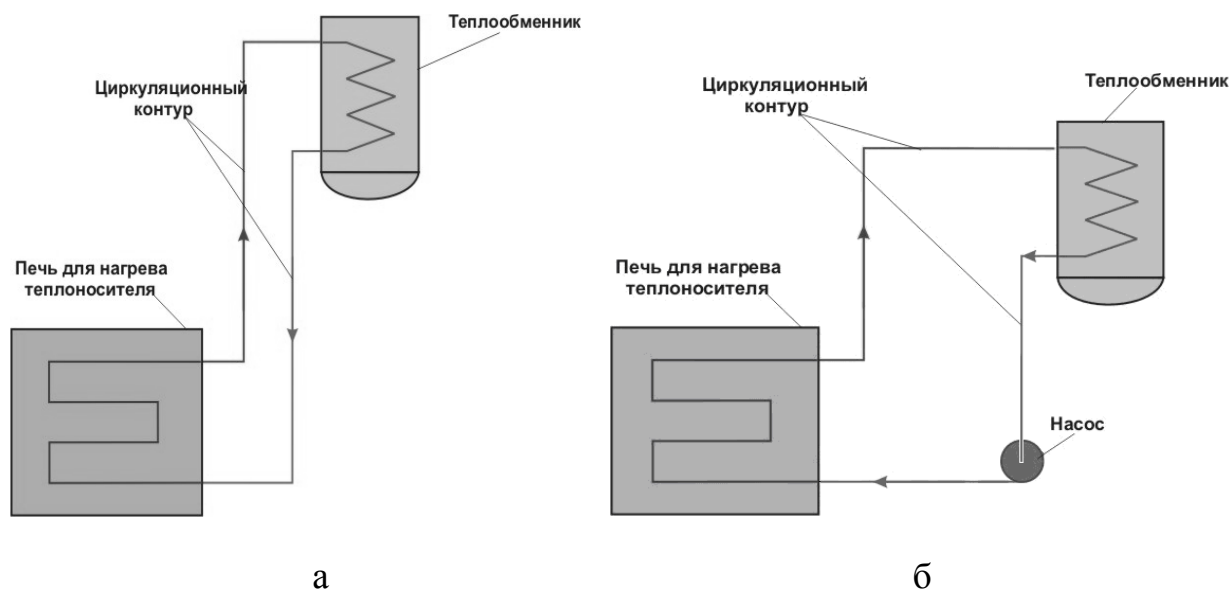


Рис. 13. Схема нагрева с естественной (а) и принудительной (б) циркуляцией

Поскольку к качеству греющей воды предъявляются высокие требования в плане отсутствия в ней механических примесей и солей жёсткости, а водоподготовка является дорогостоящим процессом, то целесообразно повторное использование отработанной воды. Поэтому при использовании горячей воды в качестве теплогента часто применяют циркуляционный способ обогрева

(рис. 13). По этому способу обогрева теплогент циркулирует по замкнутому контуру между печью или другим нагревательным аппаратом и теплообменником, где он отдаёт полученное в первом аппарате тепло. Такая циркуляция может быть естественной или принудительной. Естественная циркуляция возникает за счёт разности плотностей нагретого и охлаждённого теплогента, для этого нужно, чтобы перепад высот между теплообменником и печью был не менее 4–5 м. Скорость естественной циркуляции незначительна – около 0,2 м/с.

Принудительная циркуляция осуществляется с помощью насоса, при этом отпадают ограничения по высоте расположения аппаратов. Однако работа насоса при перекачивании жидкостей при температуре близкой к температуре кипения сопряжена с рядом трудностей (прежде всего, с опасностью возникновения кавитации), вследствие чего установки с принудительной циркуляцией менее надёжны и более дороги при эксплуатации.

Интервал рабочих температур жидкой воды как теплогента ограничен температурой её кипения и при атмосферном давлении составляет 50–95 °С. Однако повышение давления до 0,5 МПа, позволяет расширить интервал до 150 °С без серьёзного усложнения оборудования. Использование перегретой воды при более высоких температурах (до 300–350 °С) и давлениях (до 10–20 МПа) сопряжено с существенным усложнением оборудования и делает невозможным применение некоторых типов теплообменных аппаратов.

Достоинства воды как теплогента:

- 1) Доступность воды.
- 2) Высокая теплоёмкость воды по сравнению с органическими жидкостями (4,19 кДж/(кг·К) у горячей воды, примерно 1,5–2 кДж/(кг·К) у органических жидкостей).
- 3) Невысокая вязкость воды по сравнению с органическими жидкостями.
- 4) Высокий коэффициент теплоотдачи (примерно в 5–6 раз выше, чем у органических жидкостей).
- 5) Нетоксичность, пожаро- и взрывобезопасность, экологическая безопасность.

Недостатки воды как теплоносителя:

1) Ограниченный температурный интервал вследствие резкого повышения необходимого давления для перегретой воды.

2) Высокие требования к качеству очистки воды от солей жёсткости, способных образовывать накипь на стенках аппаратов.

3) Коррозионная активность воды по отношению к обычной стали и чугуну, из которых выполняются большинство трубопроводов и аппаратов.

1.6. Минеральные масла

Получение и область применения

Минеральными маслами называют жидкие смеси высококипящих углеводородов (температура кипения $300\div 600$ °С), главным образом алкилнафтяных и алкилароматических, получаемые переработкой нефти. Исторически минеральные масла были одними из первых высокотемпературных промежуточных теплоносителей, позволяющих осуществлять транспортировку тепловой энергии от дымовых газов к потребляющим аппаратам в тех случаях, когда использование воды и водяного пара невозможно из-за высокого давления. Нагрев минеральных масел производят в аппаратах, аналогичных представленным на рис. 2 и 3. При использовании минеральных масел в качестве теплоносителя часто применяют циркуляционный способ обогрева с естественной (рис. 13, а) или принудительной (рис. 13, б) циркуляцией. Однако образование в минеральных маслах твёрдых или газообразных продуктов их разложения и окисления требует установки на циркуляционный контур устройств для удаления этих продуктов: фильтров, сепараторов и т.п.

Достоинства минеральных масел как теплоносителя:

1) Возможность нагрева до высоких температур без повышения давления.

2) Отсутствие коррозионного действия большинства минеральных масел на материал трубопроводов и материалов.

3) Невысокая стоимость и доступность по сравнению с другими высокотемпературными теплоносителями.

4) Нетоксичность.

Недостатки минеральных масел как теплоагента:

1) Невысокая теплоёмкость минеральных масел и низкий коэффициент теплоотдачи приводят к низкой производительности теплообменной аппаратуры.

2) Высокая вязкость, ещё более возрастающая в ходе длительной эксплуатации из-за окисления и полимеризации. Высокая вязкость минеральных масел при комнатной температуре приводит к значительным сложностям при пуске установок с масляным обогревом (для ускорения пуска трубопроводы и аппараты в некоторых случаях приходится снабжать паровыми рубашками).

3) Разложение минеральных масел при перегреве, что ограничивает рабочий интервал температур (обогрев минеральными маслами редко применяют для температур выше 200–300 °С).

4) Постепенное разложение, окисление или полимеризация минеральных масел, что влечёт необходимость их частой замены, а также установки на циркуляционный контур дополнительных устройств, удаляющих твёрдые и газообразные продукты разложения.

5) Загрязнение поверхностей трубопроводов и аппаратов продуктами разложения или полимеризации минеральных масел.

6) Горючесть минеральных масел и взрывоопасность их паров.

1.7. Высокотемпературные органические теплоносители

Получение и область применения

По сравнению с нагревом перегретой водой нагрев горячими жидкостями, позволяющими получать те же и даже более высокие температуры без необходимости существенного увеличения давления в системе, проще и экономичнее. К числу таких жидкостей относят высокотемпературные органические теплоносители (ВОТ), это как индивидуальные органические вещества (этиленгликоль, глицерин, нафталин и его производные, дифенил и продукты его хлорирования, полифенолы), так и их смеси, например, дифенильная смесь.

Жидкие ВОТ используют как промежуточные теплоносители, осуществляющие транспортировку тепловой энергии, получаемой от дымовых газов. Нагрев жидких ВОТ производят в аппаратах, аналогичных представленным на рис. 2 и 3. При необходимости нагрев производят под давлением во избежание

закипания жидкости. При использовании ВОТ в качестве теплоагента часто применяют циркуляционный способ обогрева с естественной (рис. 13, а) или принудительной (рис. 13, б) циркуляцией.

Достоинства жидких ВОТ как теплоагента:

1) Возможность нагрева до высоких температур без существенного повышения давления (нагрев жидкой дифенильной смесью при атмосферном давлении проводят до 255 °С, под избыточным давлением – до 380 °С).

2) Отсутствие коррозионного действия большинства ВОТ на материал трубопроводов и материалов.

3) Низкая токсичность большинства ВОТ.

Недостатки жидких ВОТ как теплоагента:

1) Меньшая, чем у воды теплоёмкость ВОТ.

2) Меньший, чем у воды коэффициент теплоотдачи (дифенильная смесь имеет коэффициент теплоотдачи около 200÷350 Вт/(м²·К)).

3) Горючесть большинства ВОТ.

4) Стоимость ВОТ существенно выше стоимости воды.

5) Большинство ВОТ разлагаются при резком повышении температуры (дифенильная смесь начинает быстро разлагаться при 400 °С).

Состав наиболее распространённых ВОТ

Дифенильная смесь (даутерм) – эвтектическая и азеотропная бинарная смесь, содержащая 26,5 % дифенила и 73,5 % дифенилового эфира, с температурой плавления 12 °С и температурой кипения при атмосферном давлении 258 °С.

Двойная нафталиновая смесь – эвтектическая бинарная смесь, содержащая 15 % нафталина и 85 % дифенилового эфира, рабочий интервал температур ограничен с одной стороны температурой плавления смеси 12 °С, с другой стороны – температурой термического разложения нафталина 320 °С.

Тройная нафталиновая смесь – эвтектическая трёхкомпонентная смесь, содержащая 15 % нафталина, 25,5 % дифенила и 59,5 % дифенилового эфира, рабочий интервал температур ограничен с одной стороны температурой плавления смеси 4 °С, с другой стороны – температурой термического разложения нафталина 320 °С.

ПАБ – смесь ароматических углеводородов, являющихся производными дифенила и дифенилалканов (70 %), алкилбензолов (7 %) и алкилированных ароматических углеводородов (21 %) с примесью насыщенных углеводородов (2%).

1.8. Ионные высокотемпературные теплоносители

Состав и область применения

Ионными высокотемпературными теплоносителями (ИВТ) являются расплавы солей. Из последних наибольшее распространение получила тройная нитрит-нитратная смесь, содержащая 40 % Na NO_2 , 7 % Na NO_3 , 53 % KNO_3 , имеющая температуру плавления 142,3 °С. Также применяется двойная нитрит-нитратная смесь, содержащая 45 % Na NO_2 и 55 % KNO_3 .

Жидкие ИВТ используют как промежуточные теплоносители, осуществляющие транспортировку тепловой энергии, получаемой от дымовых газов. Нагрев жидких ИВТ производят в аппаратах, аналогичных представленным на рис. 2 и 3.

Достоинства жидких ИВТ как теплоагентов:

- 1) Высокие температуры нагрева (до 540 °С).
- 2) Невысокая токсичность.

Недостатки жидких ИВТ как теплоагентов:

- 1) Высокая температура плавления может привести к затвердеванию теплоносителя в трубопроводах, во избежание этого требуется оснащать трубопроводы системой парового подогрева.
- 2) Высокое коррозионное действие на материал.
- 3) Разложение при резком возрастании температуры (нитрит-нитратная смесь начинает разлагаться при температуре 550 °С).

1.9. Кремнийорганические высокотемпературные теплоносители

Состав и область применения

Кремнийорганические высокотемпературные теплоносители (КВТ) иногда относят к группе ионных высокотемпературных органических теплоносителей.

лей, однако вследствие отличия свойств КВТ от свойств расплавов солей их следует рассмотреть отдельно.

КВТ представляют собой силиконы (полиорганосилоксаны), например: тетракрезилоксисилан, тетракселилоксисилан, арил- и алкилполисилоксаны. Тетракрезилоксисилан является эфиром кремниевой кислоты и крезол. Он представляет собой жидкость светло-коричневого цвета с температурой плавления $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температурой кипения при атмосферном давлении $440\text{ }^{\circ}\text{C}$. Горит сильнокопящим пламенем, не ядовит, не вызывает коррозии, взрывобезопасен.

КВТ используют как промежуточные теплоносители, осуществляющие транспортировку тепловой энергии, получаемой от дымовых газов.

Достоинства жидких КВТ как теплоагентов:

- 1) Низкие температуры плавления, благодаря которым теплоноситель не застывает в трубопроводах и аппаратах даже при комнатной температуре.
- 2) Безопасны (нетоксичны, взрывобезопасны, трудновоспламеняемы).
- 3) Не вызывают коррозии трубопроводов и аппаратов.

Недостатки жидких КВТ как теплоагентов:

- 1) Пары быстро разлагаются, из-за чего применение КВТ возможно только в жидком состоянии, а также не рекомендуется нагревать КВТ до температур близких к температуре кипения, что сужает рабочий температурный интервал (например, тетракрезилоксисилан рекомендуется использовать при температурах не выше $320\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- 2) Подвергаются гидролизу, поэтому аппаратура должна быть герметичной во избежание контакта КВТ с влагой.
- 3) Более высокая стоимость КВТ, по сравнению с другими теплоагентами используемыми в том же температурном интервале (ВОТ, ИВТ).

1.10. Жидкометаллические теплоносители

Получение и область применения

В качестве промежуточных теплоносителей для транспортировки тепловой энергии, получаемой от дымовых газов, при высоких температурах могут быть использованы расплавы металлов: свинца, висмута, кадмия, сурьмы, олова. Нижняя граница рабочего интервала температур определяется температурой

плавления этих металлов. Верхняя граница определяется коррозионной стойкостью материалов трубопроводов и аппаратов по отношению к данному жидкометаллическому теплоносителю, поскольку коррозионная активность расплавов металлов резко возрастает при повышении температуры.

Жидкометаллические теплоносители используют как промежуточные теплоносители, осуществляющие транспортировку тепловой энергии, получаемой от дымовых газов. Широкое распространение жидкометаллические теплоносители получили в атомной энергетике.

Достоинства жидкометаллических теплоносителей как теплоагента:

- 1) Наибольшие из всех жидких теплоносителей температуры нагрева.
- 2) Термически стойкие.

Недостатки жидкометаллических теплоносителей как теплоагента:

- 1) Высокая токсичность паров металлов.
- 2) Более низкий, чем у воды, коэффициент теплоотдачи.
- 3) Агрессивное воздействие на материалы трубопроводов и аппаратов.
- 4) Застывание металлов в трубопроводах при остывании.

2. НАГРЕВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Наряду с топочными газами электрическая энергия представляет собой прямой источник тепловой энергии. Нагрев электрическим током имеет ряд существенных преимуществ перед нагревом различными теплоносителями. В первую очередь это широкий рабочий диапазон температур, ограниченный только термической стойкостью материалов, из которых изготовлен теплообменный аппарат (электропечь). Таким образом, по широте температурного диапазона нагрев электрическим током превосходит все иные теплоносители. Вторым существенным преимуществом является компактность оборудования для нагрева электрическим током, а также удобность подвода электрического тока к теплообменному оборудованию. Не менее важное достоинство – возможность точного и быстрого регулирования нагрева.

Несмотря на столь существенные преимущества, нагрев электрическим током находит ограниченное применение в химической технологии, что связано с высокой стоимостью электрической энергии. Киловатт электрической энергии стоит в 3–5 раз дороже киловатта тепловой энергии, получаемой путём сжигания топлива. Причина такой разницы в стоимости энергии заключается в том, что большая часть электрической энергии вырабатывается на тепловых электростанциях, КПД которых не превышает 30 % (то есть, для выработки 1 кВт электрической энергии необходимо затратить не менее 3 кВт тепловой энергии). Следовательно, обратное превращение электрической энергии в тепловую существенно менее выгодно, чем непосредственное использование исходной тепловой энергии, полученной сжиганием топлива. Поэтому на химических предприятиях используют тепловую энергию, получаемую сжиганием топлива, используя для её транспортировки промежуточные теплоносители, а нагрев электрическим током применяют лишь в малотоннажных производствах, либо там, где нагрев другими способами невозможен вследствие ограниченности габаритных размеров теплообменного оборудования или необходимости очень точного регулирования нагрева.

2.1. Нагрев электрическим сопротивлением

Один из самых распространённых способов нагрева электрическим током – это нагрев электрическим сопротивлением. Различают нагрев электрическим

сопротивлением прямого и косвенного действия. В электропечах сопротивления прямого действия в электрическую цепь включается нагреваемая среда. На практике этот способ нагревания реализуют в аппарате, корпус которого является одним из электродов, а другой электрод размещают непосредственно в нагреваемой среде. Достоинство прямого нагрева перед косвенным в большей компактности оборудования и более полном использовании тепловой энергии (поскольку тепловая энергия образуется непосредственно в нагреваемой среде). Однако прямой нагрев имеет ряд ограничений, связанных с дополнительными требованиями к электропроводности нагреваемой среды, а также с проблемой распространения электрического тока по нагреваемой среде за пределы аппарата.

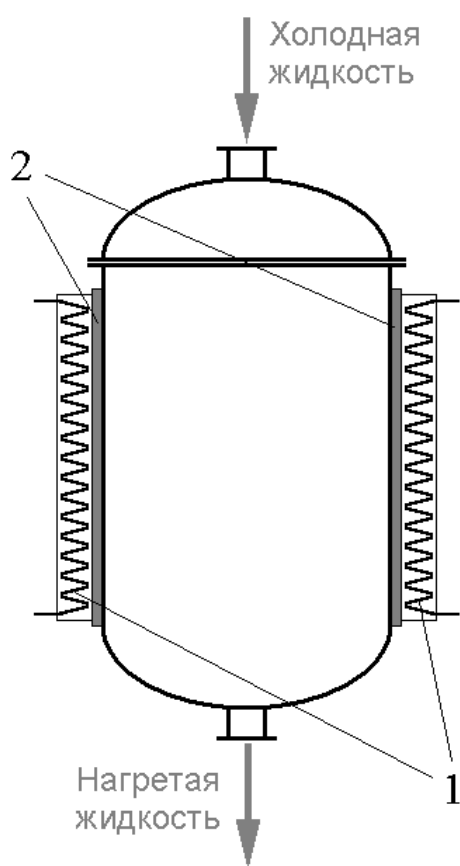


Рис. 14. Схема аппарата косвенного способа нагрева электрическим сопротивлением: 1 – спирали нагревательного элемента; 2 – электроизоляция между нагревательным элементом и металлическим корпусом аппарата

Более широкое применение получили электропечи сопротивления косвенного действия (рис. 14), где теплота выделяется в специальных нагревательных элементах, по которым проходит электрический ток. При этом нагреваемой среде тепло передаётся теплопроводностью и излучением. Нагревательные элементы чаще всего представляют собой проволочные или ленточные спира-

ли, изготавливаемые из металлических сплавов с высоким (для металлов) электрическим сопротивлением, например, из нихрома – сплава, содержащего 20 % хрома, 30÷79,5 % никеля и 0,5÷50 % железа.

Достоинства нагрева электрическим сопротивлением:

- 1) Высокий КПД.
- 2) Компактность оборудования.
- 3) Возможность точного и быстрого регулирования температуры нагрева.
- 4) Высокая температура нагрева (до 1400 °С).

Недостатки нагрева электрическим сопротивлением:

- 1) Высокая стоимость электроэнергии.
- 2) Неравномерность нагрева среды (при косвенном способе нагрева).
- 3) Проблема распространения тока по нагреваемой среде (при прямом способе нагрева).
- 4) Необходимость изоляции спиралей нагревательного элемента от корпуса аппарата (при косвенном способе нагрева).

2.2. Электроиндукционный нагрев

Нагревание в индукционных электропечах осуществляется индукционными токами. При индукционном способе нагрева сам обогреваемый аппарат является сердечником соленоида, обмотки которого охватывают аппарат. При пропускании по соленоиду переменного электрического тока вокруг соленоида возникает переменное магнитное поле, индуцирующее в стенках обогреваемого аппарата электродвижущую силу и вызывающее появление вихревых токов Фуко, под действием их и происходит разогрев стенок аппарата, от которых тепло передаётся нагреваемой жидкости.

Достоинства нагрева электроиндукцией:

- 1) Равномерный нагрев.
- 2) Электрический ток не контактирует со стенками аппарата и нагреваемой средой, что повышает безопасность.
- 3) Нагревательным элементом являются сами стенки аппарата, нет препятствий передаче тепла в виде электроизоляции, как при косвенном способе нагрева электросопротивлением.

Недостатки нагрева электроиндукцией:

- 1) Высокая стоимость электроэнергии.
- 2) Менее высокие температуры нагрева, чем при нагреве электросопротивлением (температура электроиндукционного нагрева не превышает 400 °С).
- 3) Из-за значительных размеров соленоида, аппараты для нагрева электроиндукцией более громоздки, чем аппараты для нагрева электросопротивлением.

2.3. Высокочастотный диэлектрический нагрев

Высокочастотное нагревание применяют для нагревания диэлектриков (пластмасс, резины, дерева, пищевых продуктов и др.). Нагреваемый материал помещают в переменное электрическое поле с частотой 10÷100 МГц и напряжённостью 1000÷2000 В/см. Под действием переменного электрического поля молекулы диэлектрика колеблются с частотой поля и при этом поляризуются. В результате повышается энергия теплового движения молекул, а следовательно, и температура нагреваемого материала.

Достоинства высокочастотного диэлектрического нагрева:

- 1) Выделение теплоты происходит во всей толще материала, в результате чего он прогревается равномерно.
- 2) Нагревание протекает с высокой скоростью.
- 3) Процесс нагрева легко регулируется и может быть полностью автоматизирован.

Недостатки высокочастотного диэлектрического нагрева:

- 1) Высокая стоимость электроэнергии.
- 2) Сложность и громоздкость оборудования.
- 3) Необходим ток высокой частоты.

2.4. Электродуговой нагрев

Нагревание в электродуговых печах происходит за счет того, что электрическая энергия превращается в теплоту, выделяемую пламенем дуги, возникающей между электродами. Электрическая дуга позволяет сконцентрировать большую электрическую мощность в малом объеме, внутри которого раскален-

ные газы и пары переходят в состояние плазмы. Электродуговые печи на предприятиях химической промышленности можно встретить, например, в производствах карбида кальция. Наиболее широко их используют для плавки металлов.

Достоинства электродугового нагрева:

- 1) Самые высокие температуры нагрева (до 3 000 °С).

Недостатки электродугового нагрева:

- 1) Очень узкая локальная область нагрева.
- 2) Неравномерность нагрева и трудность регулирования температуры нагрева.
- 3) Необходим ток высокой частоты.

3. ХЛАДАГЕНТЫ

По фазовому состоянию хладагенты можно разделить на жидкие и газообразные. Газообразные хладагенты в химической технологии представлены в основном воздухом. Несмотря на все недостатки воздуха как хладагента (низкая плотность и теплоёмкость, низкий коэффициент теплоотдачи), он находит широкое применение благодаря дешевизне и доступности. В малотоннажных процессах находят своё применение в качестве хладагентов и другие газы, обладающие большей плотностью и теплоёмкостью, например, элегаз (SF_6), плотность которого в пять раз больше плотности воздуха, а мольная изобарная теплоёмкость в три раза больше, чем у воздуха. Однако такие газы дороги, что ограничивает их использование.

Из жидких хладагентов наиболее широко в химической технологии применяется вода, которая является вторым после воздуха по доступности хладагентом. Воздух и вода, обладая каждый своими достоинствами и недостатками, полностью обеспечивают потребности химических производств в хладагентах, когда требуется охлаждение до $30\text{ }^\circ\text{C}$. При этом «источником холода» служит окружающая среда, что существенно снижает стоимость процесса охлаждения.

Охлаждение до более низких температур требует уже специальных источников холода – холодильных машин. Здесь в качестве хладагента, обеспечивающего «доставку холода» от холодильной машины к потребляющему аппарату, также может служить вода, однако её применение ограничено температурой замерзания. Чтобы предотвратить замерзание переохлаждённой воды, в неё добавляют различные соли, например, хлорид кальция. Водные растворы солей называют холодильными рассолами, они играют роль промежуточных теплоносителей, получая холод от рабочего тела холодильной машины (источник холода) и доставляя его к охлаждаемой среде (потребитель холода).

Рабочим телом холодильных машин служат вещества, пары которых легко конденсируются при повышении давления в компрессоре холодильной машины. К их числу относятся жидкий аммиак, фреоны (хладоны), диоксид углерода. Циркулируя в холодильной машине, они забирают тепло у промежуточного теплоносителя при своём испарении или адиабатическом расширении, и отдавая его в окружающую среду при конденсации под давлением. В ряде случаев можно обойтись без промежуточного теплоносителя (холодильного рассо-

ла) и использовать в качестве хладагента непосредственно рабочее тело холодильной машины. Таким образом, фреоны, аммиак и углекислый газ также являются хладагентами, и вместе с холодильными рассолами составляют класс низкотемпературных жидких хладагентов, обеспечивающих охлаждение в интервале температур от $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 15).

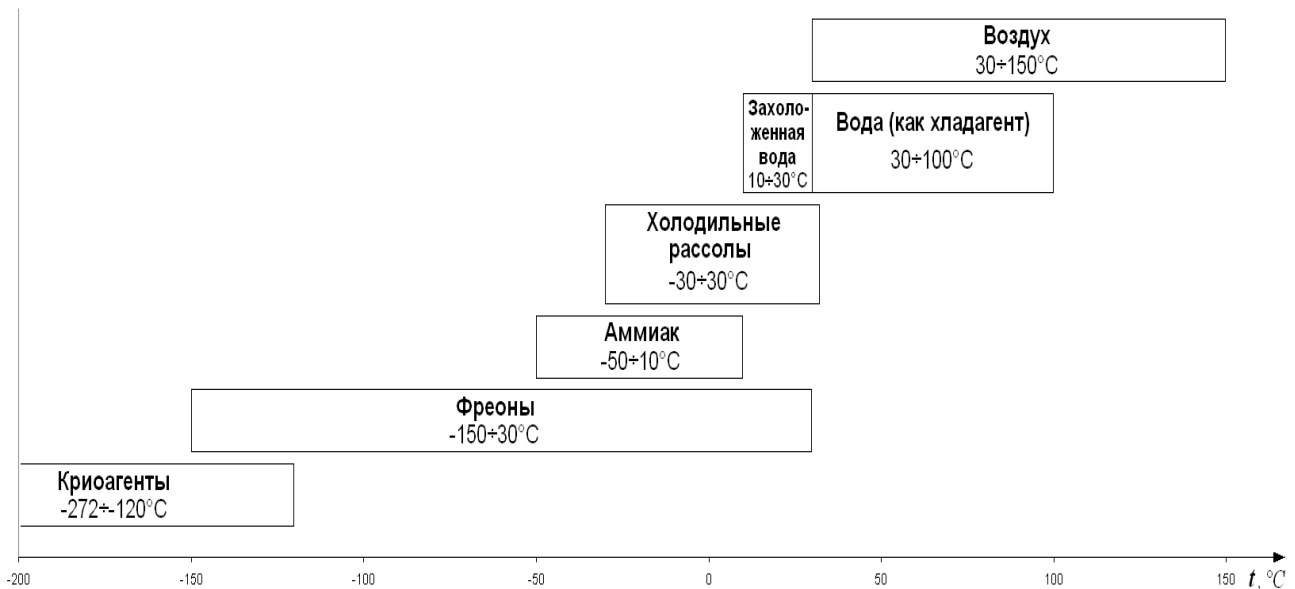


Рис. 15. Интервалы рабочих температур хладагентов

Охлаждение до температур ниже $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивают криоагенты, представляющие собой сжиженные газы: этан, метан, кислород, азот, аргон и гелий.

3.1. Воздух

Получение и область применения

Подобно тому, как дымовые газы являются прямым источником тепла, воздух – прямой источник холода. Получаемый из окружающей среды воздух обычно не требует никакой дополнительной обработки и подготовки и может быть сразу использован как хладагент. В редких случаях требуется очистка воздуха от пыли или влаги перед его использованием, но, даже с учётом этого, воздух остаётся наиболее дешёвым хладагентом.

Стоимость самого воздуха очень низка, а стоимость теплообменной аппаратуры для его использования в качестве хладагента значительна, вследствие её громоздкости. Малая плотность воздуха и его низкая теплоёмкость приводят к

тому, что через аппарат требуется прокачивать значительные объёмы воздуха, что требует большого рабочего сечения, а низкий коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху приводит к значительным размерам необходимой площади теплообменной поверхности, для повышения которой применяют оребрение со стороны воздуха (рис. 37, 38).

Недостатки воздуха, связанные с его низкой плотностью, теплоёмкостью и коэффициентом теплоотдачи существенно нивелируются, если осуществлять теплообмен не через стенку аппарата, а при непосредственном контакте теплоносителей в смесительных теплообменниках. Такой способ охлаждения воздухом применяют в основном для воды, поскольку её пары, попадающие в воздух не опасны, а сама вода достаточно дешёва, чтобы её потери за счёт частичного испарения не сказывались на рентабельности процесса. Наиболее распространёнными теплообменными аппаратами, применяемыми для охлаждения воды воздухом при непосредственном их контакте (смешении), являются градирни (рис. 50). Охлаждение воды в градирнях происходит как за счёт поглощения тепла воздухом, так, в большей степени, и за счёт частичного испарения воды.

Достоинства воздуха как хладагента:

1) Доступность: воздух имеется в любом месте предприятия и чаще всего не требует специального подвода и предварительной очистки и подготовки.

2) Дешевизна: воздух получают непосредственно из окружающей среды – он не требует специального предварительного охлаждения, являясь прямым источником холода.

3) Воздух не загрязняет поверхности аппаратов.

Недостатки воздуха как хладагента:

1) Низкая плотность воздуха ($1,29 \text{ кг/м}^3$ при н.у.) и низкая изобарная удельная теплоёмкость ($1,006 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ при н.у.) приводят к необходимости прокачивать через теплообменные аппараты значительные объёмы охлаждающего воздуха, что приводит к громоздкости оборудования.

2) Низкий коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к воздуху (около $10\div 15 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ при разнице температур между воздухом и стенкой аппарата менее 100 К) приводит к большой площади поверхности теплоотдачи, для достижения которой требуется оребрение.

3) Для повышения коэффициента теплоотдачи зачастую требуется обеспечить принудительную циркуляцию воздуха, что влечёт дополнительные затраты энергии на работу вентиляторов.

4) Несмотря на то что в зимний период воздух может иметь отрицательную температуру, проектировать теплообменное оборудование следует, исходя из наименее благоприятных – летних условий, принимая возможность охлаждения воздухом до температур не ниже 30 °С.

3.2. Вода как хладагент

Получение и область применения

Вода, как и воздух, может являться прямым источником холода в том случае, если поступает из окружающей среды. Температура такой воды будет зависеть от её источника: речная, прудовая и озёрная вода в зависимости от времени года имеет температуру 4÷25 °С, артезианская вода – температуру 8÷12 °С. При проектировании теплообменного оборудования начальную температуру охлаждающей воды следует принимать исходя из наиболее неблагоприятных – летних условий, что обеспечит надёжную работу в течении всего года. Таким образом, для воды как хладагента, не следует рассчитывать на охлаждение ниже 30 °С.

Очень важным является вопрос о конечной температуре охлаждающей воды. Чем она окажется выше, тем меньше будут затраты воды. Но высокая температура воды усугубляет проблему выпадения загрязнений на стенках аппарата. Прежде всего, это выпадение солей жёсткости, растворённых в воде гидрокарбонатов кальция и магния при переходе их в нерастворимые карбонаты. Поэтому рекомендуется обеспечить такой режим охлаждения, при котором температура охлаждающей воды на выходе из теплообменника будет составлять 40÷50°С.

Для снижения содержания в воде солей жёсткости, образующих слой накипи на стенках теплообменных аппаратов, а также для удаления других примесей, загрязняющих аппараты, проводится очистка воды. На крупных химических предприятиях очисткой воды занимается цех водоподготовки.

Водоподготовка включает следующие основные методы обработки:

- 1) осветление (удаление из воды коагуляцией, отстаиванием и фильтрованием коллоидальных и суспензированных загрязнений);
- 2) умягчение (устранение жёсткости воды осаждением солей кальция и магния, известью и содой или удаление их из воды катионированием);
- 3) обессоливание и обескремнивание (ионный обмен или дистилляцией в испарителях);
- 4) удаление растворённых газов (термическим или химическим методом) и окислов железа и меди (фильтрованием);
- 5) биологическая очистка воды от бактерий, вирусов и других микроорганизмов (в настоящее время в основном используется хлор, озон и УФ-стерилизация).

Если вода на химическом предприятии используется только в качестве хладагента, то требования к её качеству несколько ниже, чем для воды, которая служит сырьём в тех или иных химических процессах или подаётся в котлы для получения пара. Для охлаждающей воды достаточно первых двух стадий водоподготовки: осветления и умягчения. На рис. 16 представлена упрощённая схема водоподготовки, включающая эти две стадии. Осветление воды проводят обычно путём фильтрования через слой кварцевого песка 4, предварительно обработав её коагулянт (например, сульфатом железа) в отстойнике-коагуляторе 3. Умягчение воды проводят в ионообменных колоннах 5, заполненных натрий-катионитом (например, сульфоглём), где происходит ионообменная реакция – ионы магния и кальция, содержащиеся в воде, замещаются на ионы натрия. Впоследствии ионообменную смолу регенерируют, обрабатывая раствором солей натрия. Очищенная и умягчённая вода поступает в сборник холодной воды 6.

Поскольку стоимость воды, прошедшей водоподготовку, довольно высока, возникает необходимость повторно использовать отработанную тёплую воду, вместо того чтобы проводить очистку новой порции холодной воды. Кроме того, сброс отработанной тёплой воды приводит к тепловому загрязнению водоёмов. Поэтому на химическом предприятии охлаждающая вода циркулирует по замкнутому контуру, называемому водооборотным циклом (рис. 16). Холодная вода из сборника 6 поступает для охлаждения различного теплообменного оборудования (на рисунке теплообменное оборудование представлено кожухо-

хотрубчатым и пластинчатым теплообменниками 8). Оработанная вода не сбрасывается в канализацию, а собирается в сборник тёплой воды 9, откуда насосами подаётся на градирни 11. В градирнях вода охлаждается за счёт теплообмена с воздухом и своего частичного испарения и самотёком поступает в сборник холодной воды 6, где для компенсации потерь пополняется новой порцией воды, прошедшей водоподготовку.

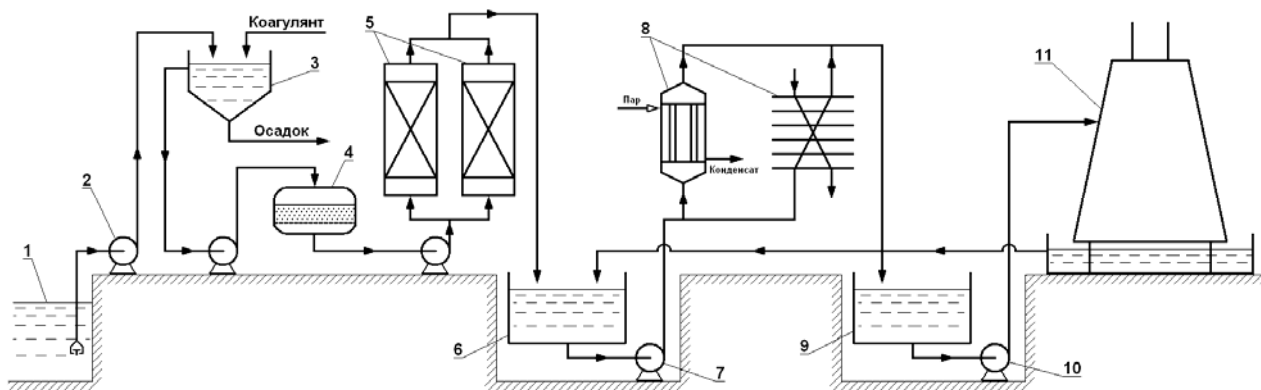


Рис. 16. Схема водоподготовки и водооборотного цикла химического предприятия:
 1 – водоём; 2 – насос водозабора; 3 – отстойник-коагулятор; 4 – фильтр со слоем кварцевого песка;
 5 – ионообменные колонны; 6 – сборник холодной воды; 7 – насос холодной воды; 8 – теплообменники; 9 – сборник отработанной (тёплой) воды; 10 – насос тёплой воды; 11 – градирня

Температура воды после градирни составляет приблизительно $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в летних условиях). Для охлаждения воды от 50 до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ необходимо чтобы в градирне испарилось менее 4% от общего количества воды. Таким образом, использование водооборотного цикла снизит затраты на водоподготовку в двадцать пять раз.

Достоинства воды как хладагента:

- 1) Невысокая стоимость воды (дороже воздуха, но дешевле, чем все другие хладагенты).
- 2) Самая высокая среди хладагентов теплоёмкость ($4,18\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$).
- 3) Высокий коэффициент теплоотдачи от стенки к воде ($1\ 000\div 6\ 000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$).
- 4) Безопасность воды (нетоксична, экологически безопасна, взрыво- и пожаробезопасна).
- 5) Вода – один из прямых источников холода, либо может быть охлаждена воздухом в градирнях.

Недостатки воды как хладагента:

1) Коррозионная активность воды (не высокая, но создающая определённые трудности при эксплуатации трубопроводов и аппаратов из обычной стали, особенно когда в трубопроводы с водой попадает воздух).

2) Содержащиеся в воде соли жёсткости загрязняют теплообменные поверхности аппаратов. Требуется либо существенное ограничение температурного режима, либо тщательная очистка (умягчение) воды.

3) Несмотря на то что в зимний период вода может иметь температуру около $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, проектирование теплообменного оборудования следует осуществлять исходя из наименее благоприятных – летних условий, принимая возможность охлаждения водой до температур не ниже $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.3. Холодильные рассолы

Получение и область применения

Холодильными рассолами называют водные растворы солей (хлорида кальция, хлорида натрия и др.), применяемые как промежуточные теплоносители для транспортировки холода от холодильной машины к потребляющим аппаратам. Для той же цели может быть использована захоложденная вода, однако её применение ограничено температурой замерзания $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как растворы солей имеют более низкую температуру замерзания, так раствор, содержащий 30 % (массовых) хлорида кальция, замерзает при температуре ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, холодильные рассолы являются низкотемпературными хладагентами, обеспечивающими охлаждение в интервале температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть, в области, где невозможно охлаждение водой и воздухом окружающей среды. В этой области с холодильными рассолами конкурируют аммиак и фреоны (хладоны), являющиеся рабочими телами холодильных машин.

Достоинства холодильных рассолов:

1) Невысокая стоимость холодильных рассолов по сравнению с фреонами (использование холодильных рассолов позволяет значительно сэкономить фреон, которого потребовалось бы гораздо больше, если для доставки холода к потребляющим аппаратам использовался непосредственно он).

2) Замерзание части рассола концентрирует оставшуюся часть, препятствуя дальнейшему замерзанию.

3) Высокая теплоёмкость рассола, благодаря которой в случае остановки холодильной машины холодный рассол ещё какое-то время способен поддерживать низкую температуру в системе.

4) Безопасность рассолов (нетоксичны, взрыво- и пожаробезопасны).

5) Рассолы безопасны для экологии (если соблюдать правила утилизации).

Недостатки холодильных рассолов:

1) Высокая коррозионная активность (рекомендуется использовать в закрытых циклах без доступа воздуха, кислород которого, растворяясь в рассоле, повышает коррозионную активность последнего).

2) Наличие двойного перепада температур: в холодильной машине от фреона к рассолу и в аппарате от рассола к охлаждаемой среде. Это влечёт необходимость создания более глубокого холода в холодильной машине, чем при непосредственном охлаждении фреоном.

3) Высокая вязкость рассолов по сравнению с фреонами, что приводит к дополнительным затратам на перемещение рассолов.

3.4. Аммиак как хладагент

Получение и область применения

Аммиак в нормальных условиях – бесцветный газ с резким запахом, под избыточным давлением легко сжижается. Температура плавления аммиака $-77,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипения под атмосферным давлением $-33,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти свойства позволяют использовать аммиак как рабочее тело холодильных машин (как абсорбционных, так и компрессионных).

Аммиак относится к числу важнейших продуктов химической промышленности, ежегодное его мировое производство достигает 150 млн тонн. Благодаря своему широкому распространению и относительно небольшой (по сравнению с фреонами) стоимости, аммиак широко применяется в холодильной технике в качестве холодильного агента R717. Первое применение аммиака как холодильного агента произошло в 1859 г., когда Фердинанд Карре соорудил аб-

сорбционную холодильную машину на аммиаке. До 30-х гг. XX века аммиак был самым распространённым холодильным агентом. Конкуренцию ему составляли углекислый газ и диоксид серы. Появление фреонов (хладонов) привело к исчезновению углекислого газа и диоксида серы, как холодильных агентов, а использование аммиака существенно сузилось. Однако до настоящего времени аммиак продолжает оставаться самым распространённым холодильным агентом промышленных холодильных установок, когда нет проблем с обеспечением безопасности их эксплуатации, а использование фреонов слишком дорого из-за необходимости большого количества холодильного агента для заполнения системы.

Достоинства аммиака как хладагента:

1) Являясь рабочим телом холодильной машины и имея невысокую стоимость, аммиак может быть использован для подвода холода непосредственно к охлаждаемой среде (в отличие от фреонов, для экономии которых используют промежуточные хладагенты).

2) Высокая теплоёмкость жидкого аммиака (близка к теплоёмкости воды).

3) Низкая вязкость жидкого аммиака (в семь раз ниже вязкости воды).

4) Высокий коэффициент теплоотдачи от стенки к аммиаку.

5) Аммиак имеет оптимальные свойства в наиболее важном для холодильной техники температурном интервале от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6) Не оказывает корродирующего действия на материал трубопроводов и аппаратов.

7) Экологически безопасен (крупные аварийные выбросы аммиака, конечно, оказывают негативное воздействие на природу, однако сам по себе аммиак встречается везде, где есть материал биологического происхождения, так как образуется в результате разложения азотсодержащих органических веществ, и, следовательно, не является чуждым и опасным для биосферы веществом).

Недостатки аммиака как хладагента:

1) По физиологическому действию на организм относится к группе веществ удушающего и нейротропного действия. Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны производственного помещения составляет

20 мг/м³, раздражение полости рта проявляется при содержании аммиака в воздухе 280 мг/м³, глаз – 490 мг/м³. Однако опасность аммиака несколько нивелируется его сильным запахом (ощущается при концентрации 37 мг/м³), позволяющим сразу определить присутствие аммиака в воздухе. Кроме того, аммиак легче воздуха, а следовательно, будет выходить из помещения через вентиляционную систему.

2) Пожаро- и взрывоопасен.

3.5. Фреоны (хладоны)

Получение и область применения

Фреоны (хладоны) – техническое название группы насыщенных алифатических фторсодержащих углеводородов, применяемых в качестве хладагентов. Кроме атомов фтора фреоны могут содержать атомы хлора или брома. Название «фреон» фирмы DuPont (США) в течение многих лет использовалось в литературе как общетехнический термин для хладагентов, в СССР и РФ укоренился термин «хладоны».

Известно более 40 различных фреонов. Наиболее широко в качестве хладагентов применяют R12 (дифтордихлорметан) и R22 (хлордифторметан). В одноступенчатых установках, работающих при температурах кипения –25 °С и выше, используют в основном R12. Применение R12 наиболее эффективно в установках, работающих при высоких температурах конденсации. Объёмные холодопроизводительности R22 и аммиака близки, однако при снижении температуры кипения до –70 °С у R22 становится в 1,5 раза выше, чем у аммиака. Поэтому R22 широко применяют в низкотемпературных холодильных установках: в одноступенчатых (до температур –40 °С), в двухступенчатых (до –70 °С), а также в верхних ветвях каскадных установок.

Правила цифрового обозначения фреонов

По международному стандарту ISO № 817-74 техническое обозначение фреона (хладона) состоит из буквенного обозначения R (от слова refrigerant) и цифрового обозначения:

- первая цифра справа – это числа атомов фтора в соединении;

- вторая цифра справа – это число атомов водорода в соединении плюс единица;
- третья цифра справа – это число атомов углерода в соединении минус единица (для соединений метанового ряда нуль опускается);
- число атомов хлора в соединении находят вычитанием суммарного числа атомов фтора и водорода из общего числа атомов, которые могут соединяться с атомами углерода;
- для циклических производных в начале определяющего номера ставится буква С;
- в случае, когда на месте хлора находится бром, в конце определяющего номера ставится буква В и цифра, показывающая число атомов брома в молекуле.
- в случае, когда на месте хлора находится иод, в конце определяющего номера ставится буква I и цифра, показывающая число атомов иода в молекуле.

Достоинства фреонов:

- 1) Благодаря своему многообразию фреоны обеспечивают охлаждение в широком температурном интервале от $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 2) Высокие объёмные холодопроизводительности значительной части фреонов (не уступающие аммиаку).
- 3) Фреоны химически инертны, не оказывает корродирующего действия на материал трубопроводов и аппаратов.
- 4) Фреоны не токсичны и безопасны для человека.
- 5) Фреоны пожаро- и взрывобезопасны.
- 6) Фреоны, являясь хорошими растворителями, смывают загрязнения с внутренних поверхностей трубопроводов и аппаратов.

Недостатки фреонов:

- 1) Пары фреонов, попадая в атмосферу, способствуют разрушению озонового слоя.
- 2) При нагревании выше $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ или под действием открытого пламени образуют ядовитые вещества, в том числе фосген.
- 3) Более высокая стоимость фреонов по сравнению с аммиаком.

4. ТЕПЛООБМЕННИКИ

Теплообменные аппараты классифицируют в зависимости от формы поверхности, вида теплоносителей, способа передачи тепла. В соответствии с последним показателем теплообменники подразделяют на поверхностные (рекуперативные), смесительные (контактные), регенеративные (рис. 17).

Поверхностные теплообменники представляют собой наиболее значительную группу аппаратов, используемых в химической технологии. В таких аппаратах теплоносители разделены стенкой, сквозь которую тепло передаётся за счёт теплопроводности материала стенки. Главной характеристикой таких аппаратов является площадь поверхности стенки, поскольку именно от её размера зависит количество тепла, передаваемое в аппарате от одного теплоносителя к другому. Поэтому поверхности стенки придают сложную форму, стремясь достичь значительной её площади при ограниченных габаритных размерах аппарата. Если поверхность теплообмена формируется из труб, то такие теплообменники называют *трубчатыми*. Это самый многочисленный подкласс теплообменных аппаратов, к которому относятся кожухотрубчатые, элементные (секционные), двухтрубчатые («труба в трубе»), оросительные, погружные и оребренные теплообменники. Теплообменники с плоской поверхностью теплопередачи представлены тремя видами аппаратов: пластинчатыми теплообменниками, спиральными теплообменниками и аппаратами с двойными стенками (рубашками). Отдельный подкласс составляют блочные теплообменники, изготавливаемые из графитовых или фторопластовых блоков.

В **смесительных (контактных) теплообменниках** теплообмен происходит при непосредственном соприкосновении теплоносителей. К этому классу относятся рассмотренные выше аппараты для острого нагрева паром (рис. 5), а также градирни и барометрические конденсаторы.

В **регенеративных теплообменниках** процесс переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному разделяется по времени на два периода. В первый период насадка теплообменника аккумулирует тепло при прохождении через неё горячего теплоносителя, а затем, во второй период, отдаёт тепло холодному теплоносителю. Теплообменники этого типа часто применяют для регенерации теплоты отходящих дымовых газов.

По назначению поверхностные теплообменные аппараты подразделяют на следующие типы:

холодильники – теплообменные аппараты, применяемые для охлаждения жидких или газовых сред водой или другим хладагентом;

подогреватели – теплообменные аппараты, применяемые для нагрева жидких или газовых сред жидким теплоносителем или конденсирующимся паром;

конденсаторы – теплообменные аппараты, применяемые для конденсации паров при охлаждении водой или другим хладагентом;

испарители – теплообменные аппараты, применяемые для испарения жидкостей при обогреве паром или жидким высокотемпературным теплоносителем.

Следует отметить, что деление типов теплообменных аппаратов по назначению весьма условно, и теплообменные аппараты одной и той же конструкции могут быть отнесены к разным типам в зависимости от процесса. Так подогреватель, где в качестве теплоносителя используется пар, отличается от конденсатора лишь тем, что целевым процессом является не конденсация пара, а подогрев жидкости за счёт выделяющегося при конденсации тепла.

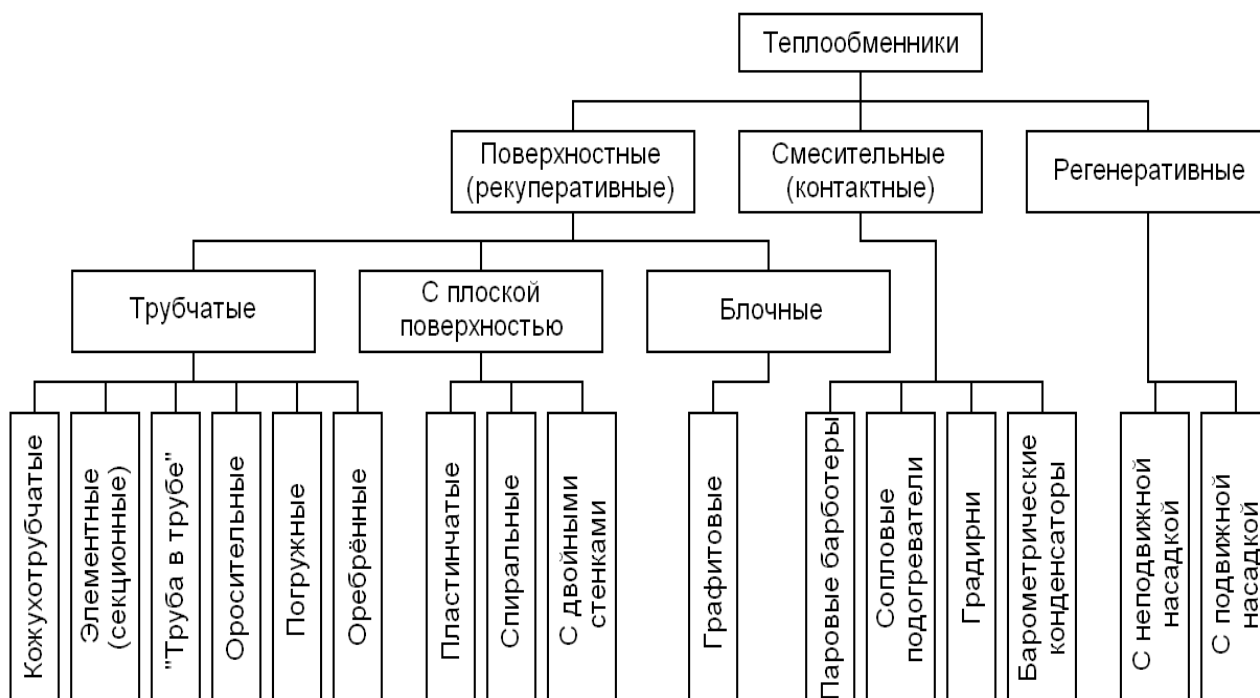


Рис. 17. Классификация теплообменных аппаратов

4.1. Кожухотрубчатые теплообменники

Устройство и принцип работы

Рассмотрим устройство кожухотрубчатых теплообменников на примере наиболее простого аппарата – вертикального одноходового кожухотрубчатого теплообменника (рис. 18). Холодный теплоноситель II подаётся через штуцер на днище 1, поступает во входную камеру, образованную днищем и нижней трубной решёткой 2. Во входной камере поток теплоносителя распределяется по трубам 3, по которым движется вверх, попадая в верхнюю камеру, образованную крышкой 4 и верхней трубной решёткой 5, и покидает аппарат через штуцер на крышке. Горячий теплоноситель I поступает в межтрубное пространство 6, где движется сверху вниз, обтекая трубы. В межтрубном пространстве установлены сегментные перегородки 7, способствующие турбулизации течения теплоносителя.

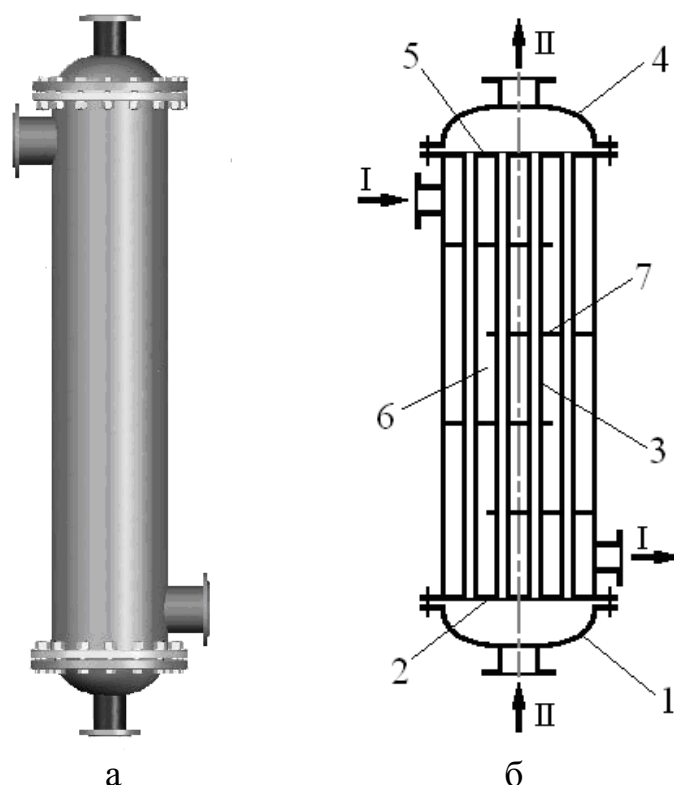


Рис. 18. Кожухотрубчатый одноходовой теплообменник, внешний вид (а) и схема устройства (б):
1 – днище; 2 – нижняя трубная решётка; 3 – трубы;
4 – крышка; 5 – верхняя трубная решётка; 6 – межтрубное пространство; 7 – сегментные перегородки; I, II – теплоносители

Такое движение теплоносителей (нагреваемый – снизу вверх, а охлаждаемый – сверху вниз) способствует более эффективному переносу теплоты, так как направление движения совпадает с направлением, в котором стремится двигаться данный теплоноситель под влиянием изменения его плотности вследствие нагрева или охлаждения (направление естественной конвекции совпадает с направлением вынужденной конвекции).

Размещение и способы крепления труб в трубных решётках

Наиболее распространённый способ размещения труб в трубных решётках – по вершинам равносторонних треугольников (рис. 19, а). Применяются и другие способы размещения труб (рис. 19, б, в). При проектировании теплообменного аппарата важно выбрать такой способ размещения, который, с одной стороны, обеспечит максимальную компактность аппарата, а с другой – приемлемое (с точки зрения турбулизации потока, повышающей коэффициент теплоотдачи, и гидравлического сопротивления) обтекание труб потоком в межтрубном пространстве.

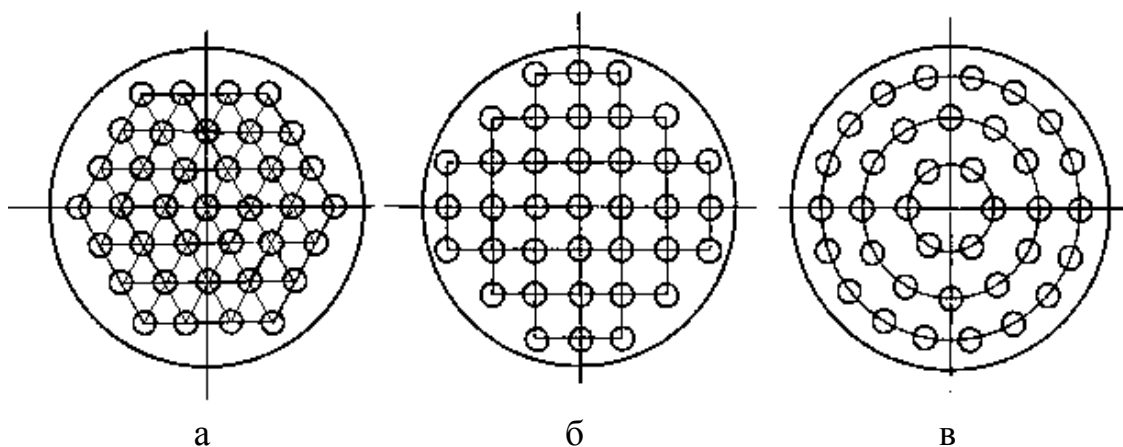


Рис. 19. Способы размещения труб в трубных решётках:
а – по вершинам равносторонних треугольников;
б – по вершинам квадратов;
в – по concentрическим окружностям

Для обеспечения герметизации теплообменников и предотвращения смешения теплоносителей разработаны различные способы крепления труб в трубных решётках (рис. 20, 21). Чаще всего трубы закрепляют при помощи развальцовки, это наиболее удобный и распространенный метод (рис. 20, а, б). Сварку (рис. 20, в) используют, когда материал труб не поддается развальцовке или при большом давлении теплоносителя. Использование сальниковых уплотнений (рис. 20, г) дорого, сложно и недостаточно надежно, хотя значительно уп-

рощает разбор теплообменника для его чистки. Кроме того, крепление труб с помощью сальникового уплотнения является одним из способов компенсации температурных деформаций теплообменника.

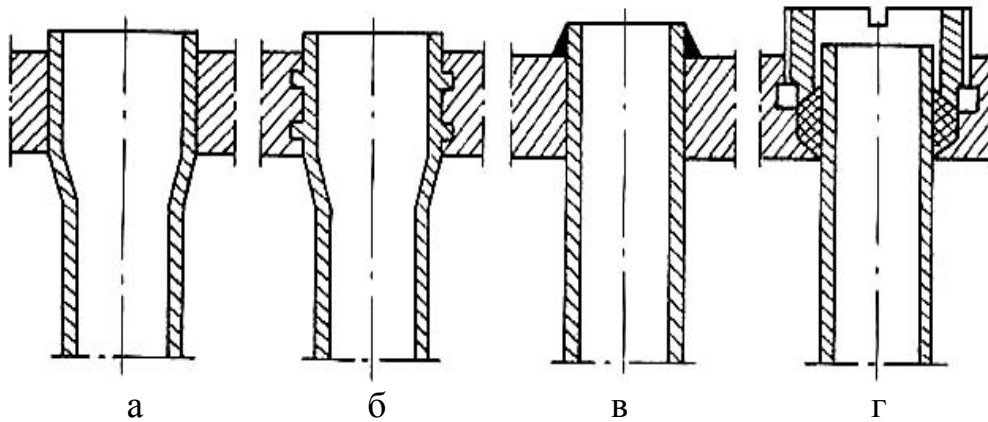


Рис. 20. Закрепление труб в трубных решетках:
а – развальцовкой; б – развальцовкой с канавками;
в – сваркой; г – сальниковыми уплотнениями

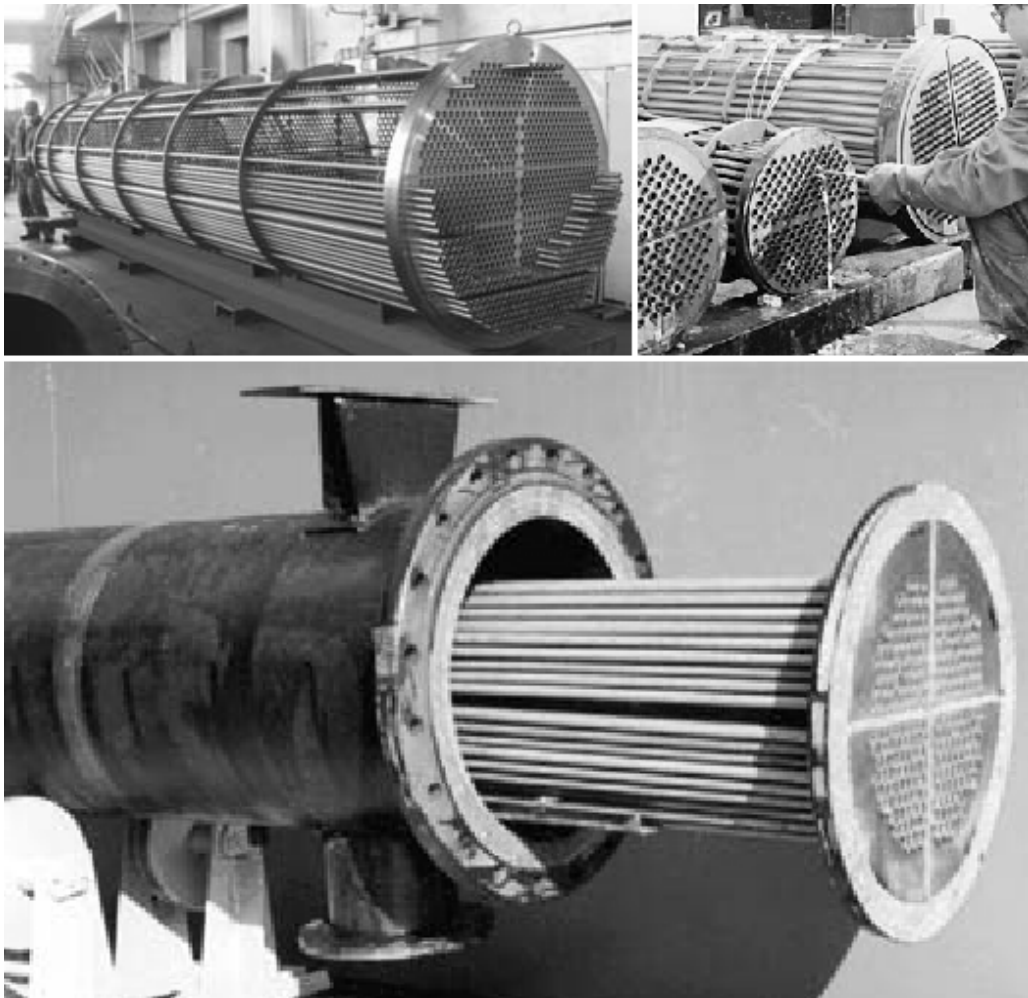


Рис. 21. Размещение труб в трубных решетках. Производство FАMET

Многоходовые кожухотрубчатые теплообменники

Большая площадь сечения трубного пространства, представляющая собой сумму площадей внутренних сечений труб теплообменника, в случае относительно небольших расходов теплоносителя, приводит к низкой скорости теплоносителя в трубах и, как следствие, к низкому значению коэффициента теплоотдачи в трубном пространстве. Такой теплообменник, где теплоноситель распределяется сразу по всем трубам, называют одноходовым, он зачастую не может обеспечить удовлетворительного теплообмена при недостаточно высоких расходах теплоносителей.

Для интенсификации теплоотдачи в трубном пространстве необходимо увеличить скорость теплоносителя в нём. Для этого теплоноситель распределяют не по всем трубам, а направляют его таким образом, чтобы он последовательно проходил сначала одну, а затем другую часть труб. При этом площадь сечения потока в трубном пространстве уменьшается, а скорость, соответственно, возрастает. Такие теплообменники называют *многоходовыми* по трубному пространству (рис. 22).

В многоходовом по трубному пространству кожухотрубчатом теплообменнике с помощью поперечных перегородок 2, установленных в крышке и днище теплообменника, пучок труб разделён на секции или ходы, по которым последовательно движется теплоноситель. Очевидно, что в таких теплообменниках скорость движения теплоносителя по трубам, при неизменном его расходе, увеличивается кратно числу ходов.

Многоходовым по межтрубному пространству часто называют теплообменник с сегментными перегородками (рис. 18, б). Сегментные перегородки необходимы для увеличения скорости движения теплоносителя в межтрубном пространстве, турбулизации режима его движения и, как следствие, увеличения коэффициента теплоотдачи. Очевидно, что установка сегментных перегородок имеет смысл лишь в том случае, если теплоноситель не меняет своего фазового состояния. В ином случае, например, когда в межтрубном пространстве конденсируется пар, сегментные перегородки будут лишь мешать нормальной работе теплообменника, препятствуя своевременному стоку конденсата.

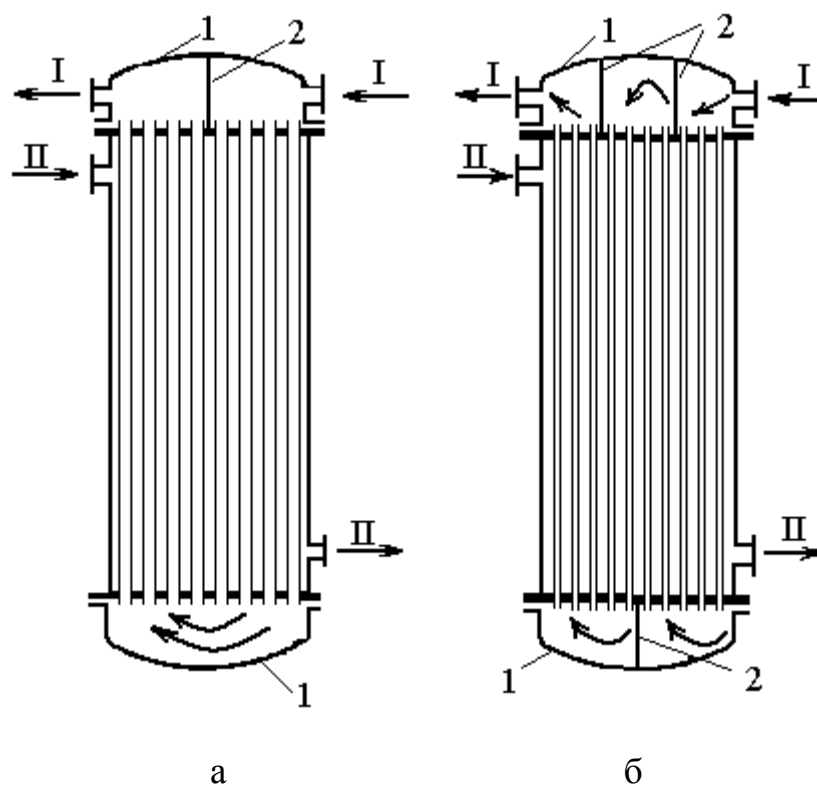


Рис. 22. Схема многоходовых (по трубному пространству) кожухотрубчатых теплообменников:
 а – двухходовой, б – четырёхходовой;
 1 – крышки и днища, 2 – перегородки;
 I, II – теплоносители

Увеличение скорости движения теплоносителей в трубном и межтрубном пространствах теплообменника влечёт за собой увеличение гидравлического сопротивления. Кроме того, переход от противотока теплоносителей (в одноходовом теплообменнике) к смешанному току (в многоходовом теплообменнике) приводит к уменьшению движущей силы процесса теплопередачи. Поэтому использование многоходового теплообменника далеко не всегда более целесообразно, чем использование одноходового.

Многоходовые теплообменники не применяют в том случае, если в трубном пространстве происходит изменение фазового состояния теплоносителя (кипение или конденсация), поскольку образующийся при кипении пар движется строго вверх, а образующаяся при конденсации жидкость – строго вниз, и они не могут преодолеть все изменения направления движения, которые претерпевает теплоноситель в многоходовом теплообменнике.

Устройства для компенсации температурных деформаций

Контактируя с горячим теплоносителем, элементы конструкции теплообменника нагреваются и удлиняются вследствие теплового расширения материала. Поскольку кожух теплообменника и его трубы контактируют с разными теплоносителями, то и температура этих элементов конструкции теплообменника различна. Если разница температур кожуха и труб достаточно велика (более 50 К), то кожух и трубы удлиняются существенно не одинаково, что влечёт за собой значительные механические напряжения в трубных решётках, и может привести к нарушению плотности соединения труб с трубными решётками. Поэтому при значительных разнице температур кожуха и труб и существенной длине труб теплообменника применяют теплообменники нежёсткой конструкции, в которых возможно перемещение труб по отношению к кожуху аппарата, либо самопроизвольное изменение длины кожуха без его разрушения.

Одной из таких нежёстких конструкций теплообменника является теплообменник, в котором трубы закреплены в трубной решётке **сальниковыми уплотнениями** (рис. 20, г). Однако, как отмечалось выше, установка сальникового уплотнения на каждую трубу теплообменника слишком трудозатратна, что сказывается на стоимости такого теплообменника. Кроме того, сальниковое уплотнение не может выдержать повышенных давлений, и в целом менее надёжно, чем другие виды крепления труб в трубных решётках.

При небольших температурных деформациях (не более 10–15 мм) и невысоких давлениях в межтрубном пространстве (не более 0,5 МПа) в качестве устройства для компенсации температурных деформаций может быть использован **линзовый компенсатор** (рис. 23, а). Линзовый компенсатор представляет собой гибкую складку на кожухе теплообменника и компенсирует температурные деформации своим осевым сжатием или расширением. Линзовый компенсатор прост, его установка не влияет существенно на стоимость теплообменника, однако он значительно снижает прочность кожуха, что ограничивает его применение.

Если отказаться от нижней трубной решётки и изогнуть трубы, закрепив обоими концами в верхней трубной решётке, то в таком теплообменнике с **U-образными трубами** (рис. 23, б, рис. 24) они смогут удлиняться или сокращаться независимо от кожуха. Очевидно, что никаких механических напряжений при этом не возникнет. Такие аппараты не имеют ограничений по темпера-

турным деформациям и давлению в межтрубном пространстве, как аппараты с линзовым компенсатором. Однако в таких аппаратах усложняется монтаж труб, затруднена очистка их внутренней поверхности.

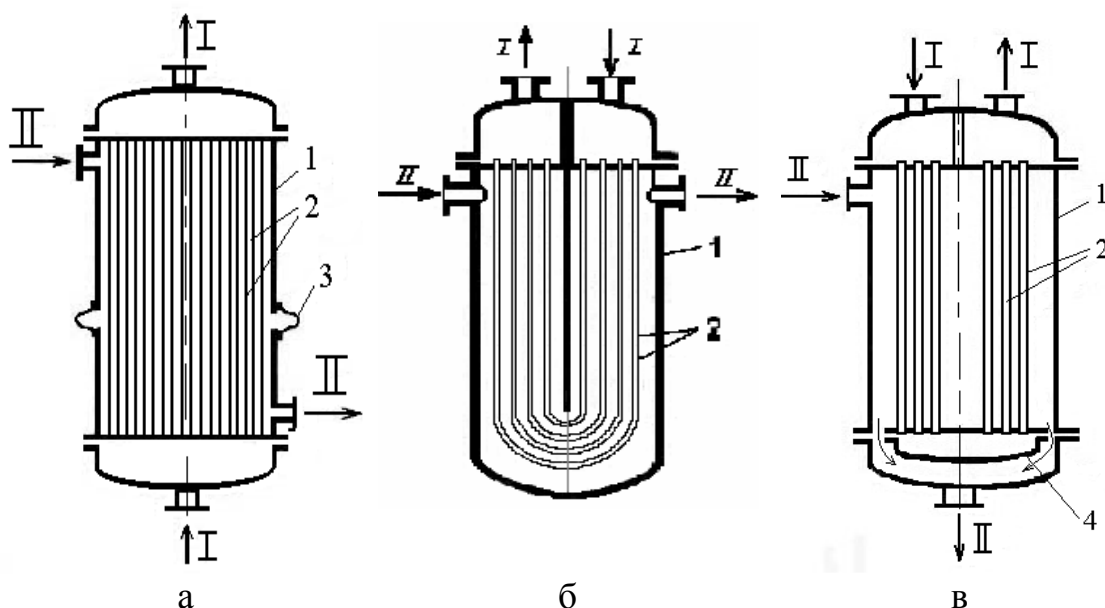


Рис. 23. Кожухотрубчатые теплообменники с устройствами для компенсации температурных деформаций:
 а – теплообменник с линзовым компенсатором (полужёсткая конструкция);
 б – теплообменник с U-образными трубами; в – теплообменник с плавающей головкой;
 1 – кожух; 2 – трубы; 3 – линзовый компенсатор; 4 – плавающая головка;
 I, II – теплоносители

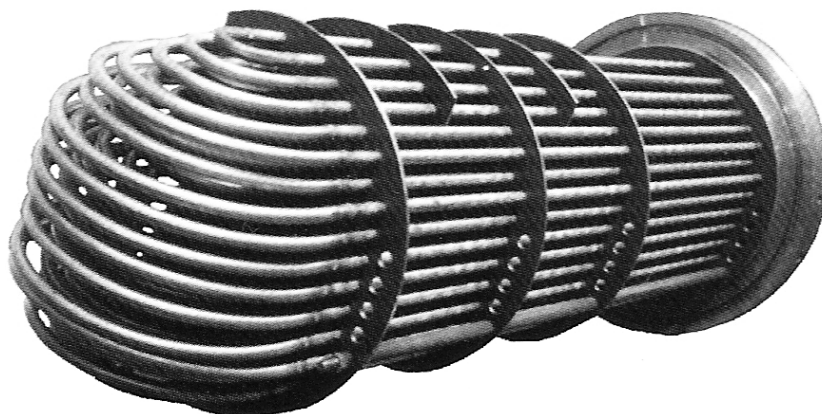


Рис. 24. Трубчатка теплообменника с U-образными трубами

Если сделать нижнюю трубную решётку не связанной с кожухом, снабдив отдельной крышкой, то она может независимо от кожуха перемещаться вдоль оси при температурных деформациях. Такой аппарат называют теплообменником с **плавающей головкой** (рис. 23, в). Обладая теми же достоинствами, что и аппарат с U-образными трубами, он лишён недостатков, связанных с

проблемой монтажа труб и механической очистки их внутренних поверхностей. Однако стоимость таких аппаратов несколько выше.

Следует отметить, что и теплообменник с U-образными трубами, и теплообменник с плавающей головкой, изображённые на рис. 23, не могут обеспечить фазовый переход теплоносителя в трубном пространстве (как и многоходовые теплообменники), то есть не могут быть использованы в качестве испарителей. В том случае, если необходим теплообменник-испаритель, а без компенсации температурных деформаций обойтись невозможно, применяют теплообменные аппараты с паровым пространством (рис. 25).

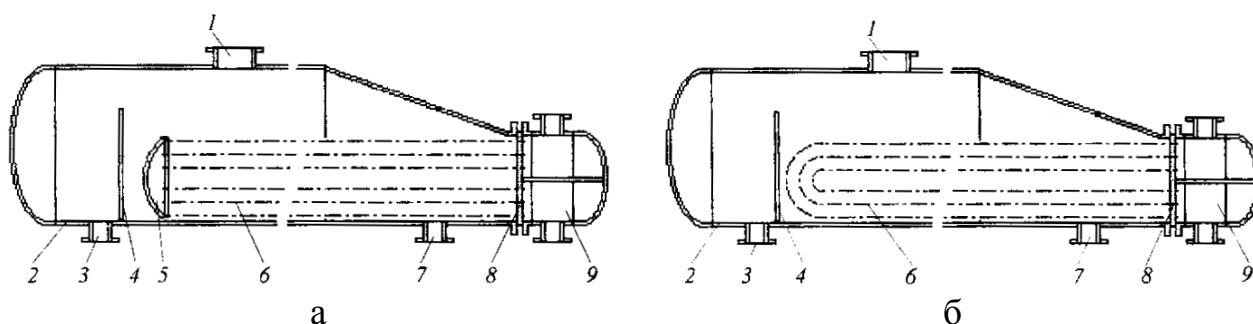


Рис. 25. Теплообменники с паровым пространством:
а – с плавающей головкой; б – с U-образными трубами;
1 – штуцер выхода паров; 2 – кожух; 3 – штуцер остатков продукта;
4 – отражательная перегородка; 5 – плавающая головка;
6 – теплообменные трубы; 7 – штуцер входа жидкости;
8 – неподвижная трубная решётка; 9 – распределительная камера

Достоинства кожухотрубчатых теплообменников:

- 1) Большая площадь поверхности теплопередачи при относительно компактных размерах кожухотрубчатого теплообменника.
- 2) Простота изготовления.
- 3) Расход материала на изготовление сравнительно невелик.
- 3) Надёжны в работе.
- 4) Способны работать под большими давлениями.

Недостатки кожухотрубчатых теплообменников:

- 1) Не способны работать при низких расходах теплоносителей.
- 2) Трудности изготовления из материала, не допускающего развальцовки и сварки.
- 3) Трудности при осмотре, чистке и ремонте.

4.2. Элементные (секционные) теплообменники

Устройство и принцип работы

Элементные (секционные) теплообменники (рис. 26) представляют собой ряд последовательно соединённых одноходовых кожухотрубчатых теплообменников, что позволяет существенно повысить скорость движения теплоносителей в межтрубном и трубном пространствах.

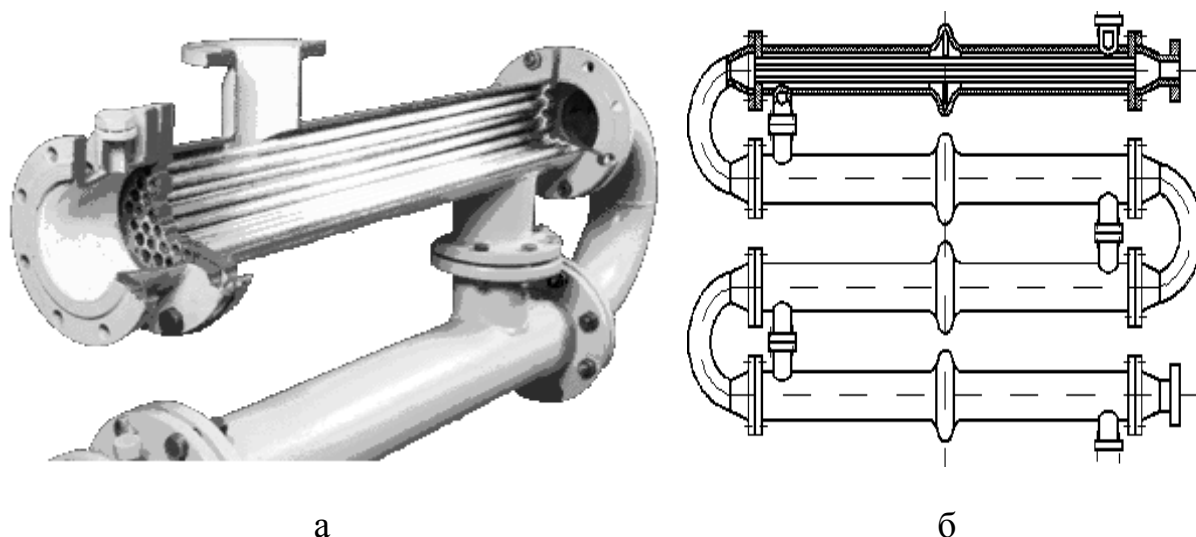


Рис. 26. Секционный теплообменник:
а – вид в разрезе; б – схема устройства

Достоинства элементных (секционных) теплообменников:

- 1) Высокая скорость движения теплоносителей.
- 2) Возможность работы при больших давлениях, благодаря меньшему, чем у кожухотрубчатых теплообменников диаметру кожуха.
- 3) Меньшее гидравлическое сопротивление межтрубного пространства, чем у кожухотрубчатых, благодаря отсутствию сегментных перегородок.

Недостатки элементных (секционных) теплообменников:

- 1) Более громоздки, чем кожухотрубчатые теплообменники.
- 2) Более высокая стоимость изготовления, чем у кожухотрубчатых теплообменников.

4.3. Двухтрубчатые теплообменники

Устройство и принцип работы

Двухтрубчатые теплообменники, применяемые при небольших тепловых нагрузках, когда требуемая поверхность теплообмена не превышает 30 м^2 , часто называют теплообменниками типа «труба в трубе». Они представляют собой набор последовательно соединённых элементов, состоящих из двух concentрически расположенных труб (рис. 27). Один теплоноситель I движется по внутренним трубам 1, другой теплоноситель II – по кольцевому зазору, образованному внешними и внутренними трубами 2. Внутренние трубы соединяются с помощью «калачей» 3, а наружные с помощью соединительных патрубков 4.

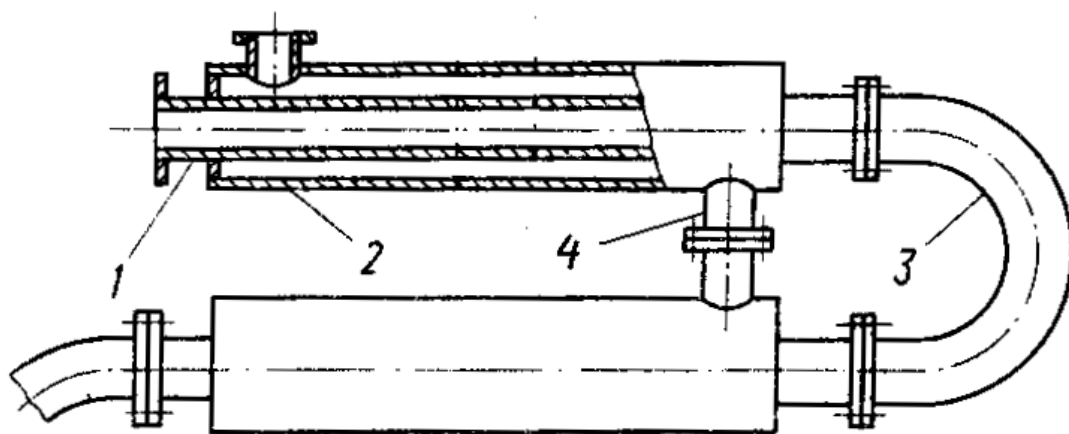


Рис. 27. Неразборный однопоточный теплообменник типа «труба в трубе»:

1 – внутренняя труба; 2 – внешняя труба;
3 – соединительное колено (калач); 4 – соединительный патрубок

Теплообменники типа «труба в трубе» могут быть следующих видов: неразборные однопоточные (рис. 27), разборные однопоточные (рис. 28), разборные двух- и многопоточные (рис. 29). Неразборные однопоточные теплообменники изготавливают путём сварки труб. Длина элемента такого теплообменника обычно составляет $3 \div 6 \text{ м}$, диаметр наружной трубы $76 \div 159 \text{ мм}$, внутренней – $57 \div 108 \text{ мм}$. Эти теплообменники могут иметь один ход или несколько (обычно чётное число) ходов. Чистка таких теплообменников затруднена, поэтому срок службы таких теплообменников недолог. Однако их низкая стоимость позволяет часто заменять такие теплообменники на новые.

Разборные теплообменники типа «труба в трубе» более сложны в изготовлении и дороги. В таких теплообменниках трубы крепятся в трубных решёт-

ках и герметизируются с помощью сальниковых уплотнений, что позволяет без особых трудностей осуществлять чистку и ремонт. Однопоточный разборный теплообменник с наружными трубами малого диаметра (не более 57 мм) имеет распределительную камеру для наружного теплоносителя, разделённую на две зоны продольной перегородкой (рис. 28). При большом диаметре наружных труб (более 57 мм) теплообменник выполняется без распределительной камеры, так как штуцер можно приварить непосредственно к наружным трубам.

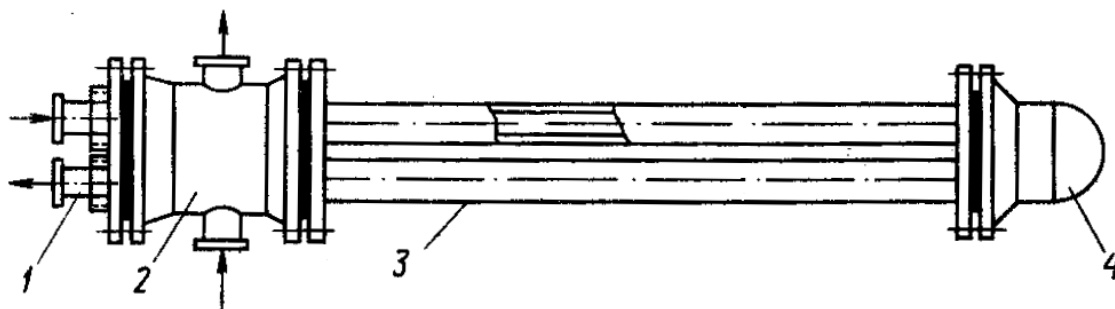


Рис. 28. Разборный однопоточный теплообменник типа «труба в трубе»:
1 – теплообменная (внутренняя) труба; 2 – распределительная камера для наружного теплоносителя; 3 – кожуховая (внешняя) труба; 4 – крышка

Двухпоточный разборный теплообменник (рис. 27) имеет две распределительные камеры, а в крышке размещены два «калача». Поверхность теплообмена и проходные сечения для теплоносителей при прочих равных условиях в два раза больше, чем в однопоточном теплообменнике. Многопоточные теплообменники принципиально не отличаются от двухпоточных.

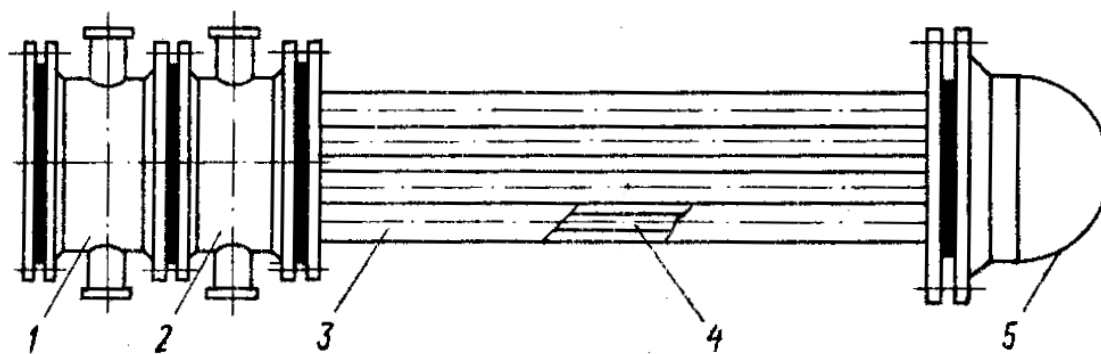


Рис. 29. Разборный двухпоточный теплообменник типа «труба в трубе»:
1, 2 – распределительные камеры соответственно для внутреннего и наружного теплоносителей;
3 – кожуховая (внешняя) труба; 4 – теплообменная (внутренняя) труба; 5 – крышка

Достоинства двухтрубчатых теплообменников:

1) Высокие коэффициенты теплоотдачи благодаря высоким скоростям движения теплоносителей.

- 2) Возможность работы при небольших расходах теплоносителей.
- 3) Возможность работы при высоких давлениях.

Недостатки двухтрубчатых теплообменников:

- 1) Относительно небольшие площади поверхности теплопередачи при значительных габаритных размерах теплообменника.
- 2) Большой расход материала на изготовление.
- 3) В неразборных двухтрубчатых теплообменниках затруднена чистка.

4.4. Оросительные теплообменники

Устройство и принцип работы

Оросительные теплообменники применяют главным образом в качестве холодильников для жидкостей и газов или как конденсаторы паров. Оросительный теплообменник представляет собой змеевик (рис. 30) из размещённых друг над другом прямых труб 1, соединённых между собой «калачами» 2, по которым протекает охлаждаемый теплоноситель. Снаружи трубы орошаются водой, которую подают в желоб 3, обеспечивающий равномерное распределение воды по всей длине верхней трубы змеевика. Вода, последовательно перетекая по наружным поверхностям расположенных одна над другой труб змеевика, частично испаряется. Не испарившаяся вода поступает в корыто 4. За счёт испарения части воды процесс теплообмена идёт интенсивнее, а расход воды на охлаждение в оросительных теплообменниках ниже, чем в холодильниках других типов. Но при этом происходит необратимая потеря испарившейся воды, а также увлажнение окружающего воздуха. Поэтому оросительные теплообменники чаще устанавливают на открытом воздухе, а при установке в помещениях снабжают кожухом и подключают к системе вытяжной вентиляции.

Достоинства оросительных теплообменников:

- 1) Простота изготовления и низкая стоимость.
- 2) Лёгкость чистки наружных стенок труб.
- 3) Интенсификация теплообмена за счёт частичного испарения воды.
- 4) Меньший расход охлаждающей воды (по сравнению с холодильниками других типов).

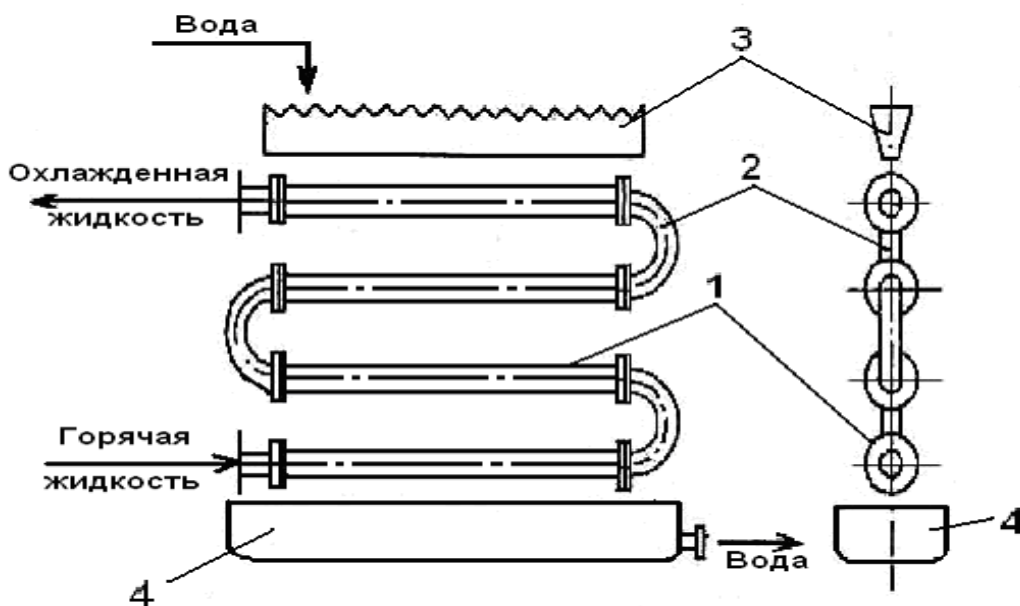


Рис. 30. Оросительный холодильник:
 1 – трубы; 2 – соединительные колена (калачи); 3 – желоб для распределения охлаждающей воды; 4 – корыто для сбора воды

Недостатки оросительных теплообменников:

- 1) Безвозвратная потеря испарившейся воды и увлажнение воздуха.
- 2) Громоздкость оросительных теплообменников (особенно снабжённых кожухами для работы внутри помещений).
- 3) Неравномерность смачивания труб (нижние ряды могут слабо смачиваться и практически не участвовать в теплообмене).

4.5. Погружные теплообменники

Устройство и принцип работы

Погружные теплообменники (рис. 31) представляют собой змеевик 2, помещённый в сосуд 1 с жидким теплоносителем I. Другой теплоноситель II движется внутри змеевика. Скорость движения теплоносителя I в сосуде аппарата мала вследствие большой площади сечения аппарата, что обуславливает низкие значения коэффициента теплоотдачи между наружной поверхностью змеевика и теплоносителем I. Иногда для увеличения коэффициента теплоотдачи увеличивают скорость циркуляции теплоносителя в аппарате путём установки направляющего стакана 3, который упорядочивает движение теплоносителя, заставляя его направленно обтекать змеевик. При этом жидкость движется либо за счёт естественной конвекции, либо принудительно под действием мешал-

ки 4. Зачастую погружной змеевик крепят к крышке аппарата, что позволяет при чистке и ремонте извлекать его из аппарата вместе со снятой крышкой.

При большом количестве этого теплоносителя применяют змеевики из нескольких параллельных секций (рис. 32, а). При больших размерах аппарата возникают сложности с изготовлением спиральных змеевиков. В этом случае змеевик может быть изготовлен из прямых труб, соединенных «калачами» (рис. 32, б).

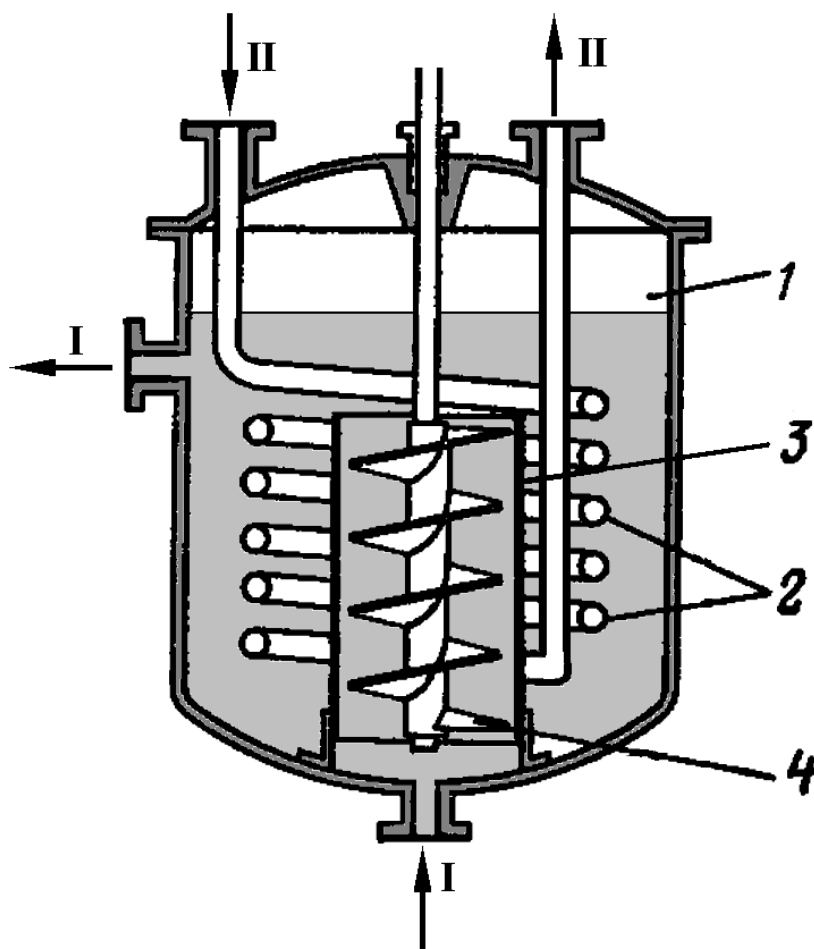


Рис. 31. Теплообменный аппарат с погружным змеевиком:
1 – сосуд аппарата; 2 – змеевик; 3 – стакан; 4 – мешалка;
I, II – теплоносители

Достоинства погружных теплообменников:

- 1) Простота устройства и низкая стоимость изготовления.
- 2) Доступность наружной поверхности для чистки.
- 3) Возможность работы при больших давлениях внутри змеевика.
- 4) Высокий коэффициент теплоотдачи внутри змеевика за счёт высокой скорости теплоносителя в змеевике.

Недостатки погружных теплообменников:

- 1) Небольшая поверхность теплопередачи (менее 15 м^2).
- 2) Недоступность внутренней поверхности змеевика для чистки.
- 3) Низкий коэффициент теплоотдачи со стороны наружной поверхности змеевика.

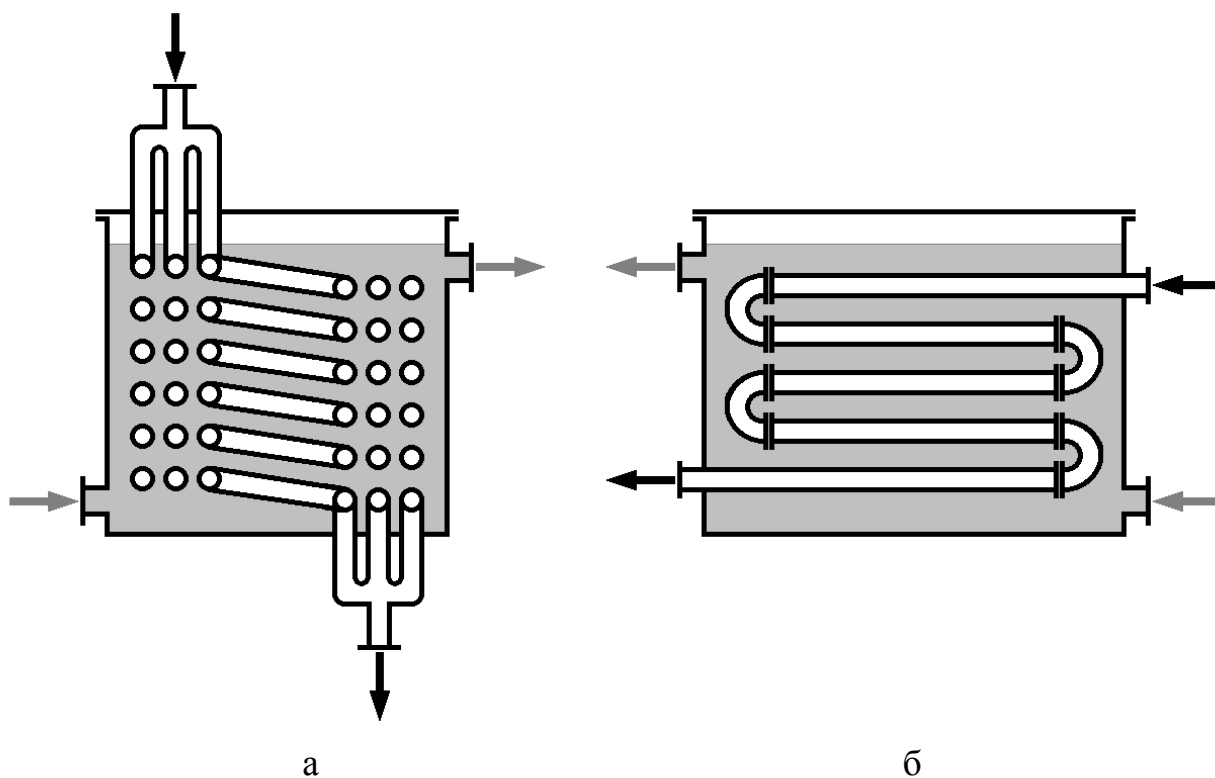


Рис. 32. Аппараты с погружными теплообменниками:
а – с тремя соосными спиральными змеевиками; б – с прямыми трубами

4.6. Теплообменники с наружными змеевиками

Устройство и принцип работы

Довольно широкое применение в химической технологии находят аппараты с наружными змеевиками (рис. 33). К стенкам аппаратов (обычно реакторов) снаружи приваривают змеевики, изготовленные из полуцилиндров или угловой стали (рис. 33, б, в). Если необходимо обеспечить в змеевика высокое давление теплоносителя (например, перегретой воды при 25 МПа), то змеевик изготавливают из труб, приваривая их к корпусу аппарата многослойным швом (рис. 33, а). Гораздо сложнее изготовить аппарат, в стенки которого змеевик

«залит» (рис. 33, г), поэтому такие аппараты используют довольно редко, несмотря на то, что они являются наиболее надёжными.

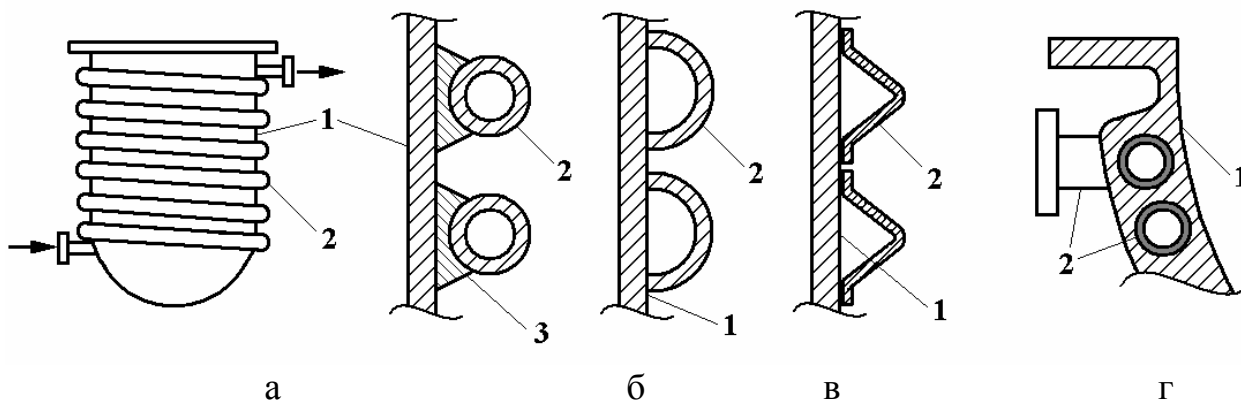


Рис. 33. Аппараты с наружными змеевиками:
 а, б, в – с приваренными снаружи змеевиками; г – со встроенными в стенку змеевиками;
 1 – корпус аппарата; 2 – змеевик; 3 – металлическая прокладка

Достоинства наружных змеевиков:

- 1) Возможность работы при больших давлениях внутри змеевика.
- 2) Простота устройства и надёжность.
- 3) Возможность разделить змеевик на секции, питаемые теплоносителем независимо, и за счёт такого разделения регулировать нагрев или охлаждение.
- 4) Высокий коэффициент теплоотдачи внутри змеевика за счёт высокой скорости теплоносителя в змеевике.

Недостатки наружных змеевиков:

- 1) Небольшая поверхность теплопередачи (менее 15 м^2).
- 2) Недоступность внутренней поверхности змеевика для чистки.
- 3) Низкий коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны корпуса аппарата.

4.7. Оребрённые теплообменники

Устройство и принцип работы

В технике достаточно часто встречаются процессы теплообмена, в которых коэффициенты теплоотдачи по разные стороны поверхности теплопередача резко различаются по величине. Так, например, при нагреве воздуха конденсирующимся водяным паром коэффициент теплоотдачи от пара к стенке состав-

ляет примерно $10\,000 \div 15\,000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а от стенки к нагревающему воздуху $10 \div 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В этом случае оребрение труб со стороны воздуха позволяет существенно повысить тепловую нагрузку теплообменника за счёт увеличения поверхности теплообмена со стороны теплоносителя с низким коэффициентом теплоотдачи. Этот принцип используют при нагреве и охлаждении газов и сильновязких жидкостей.

Очевидно, что материал, из которого изготавливают ребристые трубы, должен иметь большой коэффициент теплопроводности. Для снижения гидравлического сопротивления поверхность рёбер должна быть параллельна направлению движения потока теплоносителя. Форма рёбер может быть различной. Наиболее часто используют рёбра прямоугольного (рис. 34, а) и трапециевидного (рис. 34, б) сечения.

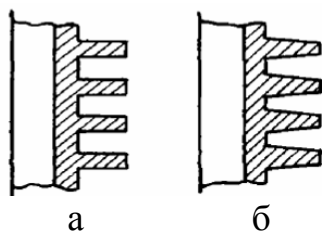


Рис. 34. Элементы трубчатого теплообменника с поперечным оребрением:
а – прямоугольные рёбра; б – трапециевидные рёбра

Конструкции оребренных теплообменников весьма разнообразны, причём разработаны конструкции как с оребренными трубами (рис. 35), так и с плоскими поверхностями теплообмена (рис. 36).

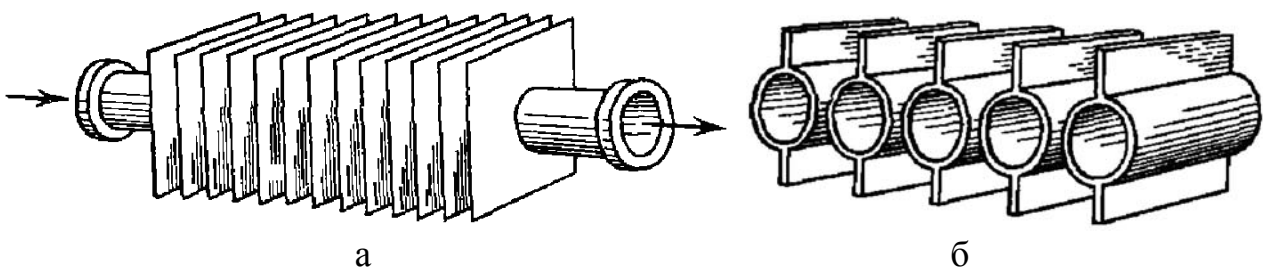


Рис. 35. Оребрение труб поперечное (а) и продольное «плавниковое» (б)

На рис. 37 представлен широко распространённый теплообменник для нагрева воздуха – пластинчатый калорифер. Поверхность теплоотдачи со стороны воздуха в таком теплообменнике достаточно велика, что позволяет проводить теплообмен за счёт естественной конвекции воздуха. Соприкасаясь с пластинами теплообменника, воздух нагревается, его плотность уменьшается, и он

поднимается вверх, а на его место приходит новая порция холодного воздуха. По такому принципу работают бытовые системы парового отопления, которые также являются оребрѐнными воздушными калориферами. Однако принудительная циркуляция воздуха существенно улучшает теплоотдачу. С этой целью пластинчатый калорифер помещают в корпус, а подачу воздуха осуществляют с помощью вентиляторов и воздуходувок.

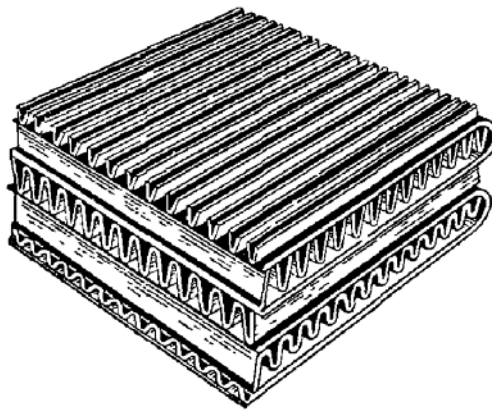


Рис. 36. Оребрение гофрированием плоских поверхностей теплообмена

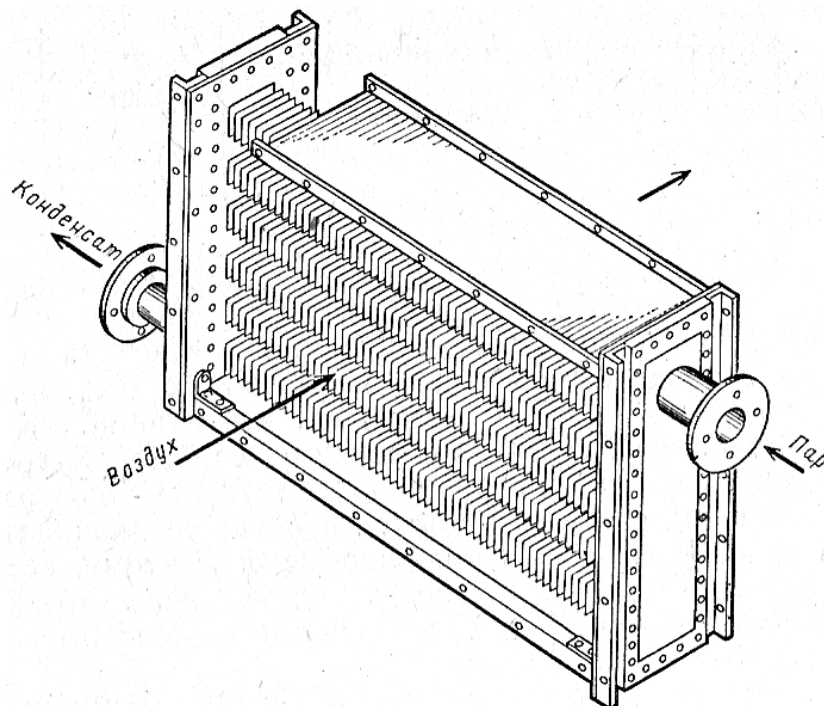


Рис. 37. Пластинчатый калорифер для нагрева воздуха

Если целевым процессом является не нагрев воздуха, а охлаждение воздухом горячего теплоносителя, то такие аппараты называют теплообменниками воздушного охлаждения (рис. 38). Основными элементами теплообменников

воздушного охлаждения являются пучок оребренных труб и мощный осевой вентилятор, создающий интенсивный поток воздуха через трубный пучок. Теплообменники воздушного охлаждения получают все более широкое применение. Это объясняется гораздо меньшей стоимостью воздуха как хладагента, по сравнению с водой.

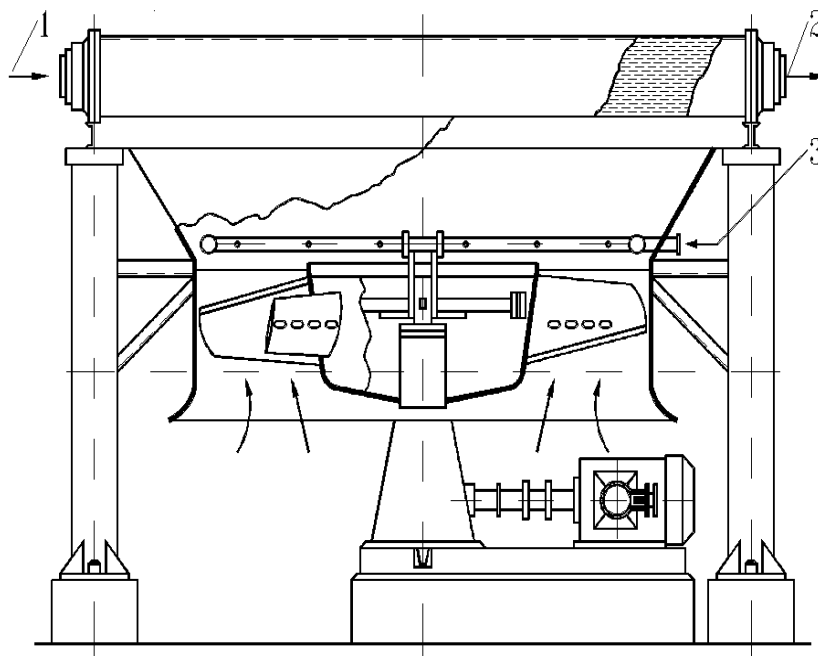


Рис. 38. Теплообменник воздушного охлаждения:
1 – вход охлаждаемого продукта; 2 – выход охлаждённого продукта;
3 – вход воды для увлажнения воздуха

Достоинства оребренных теплообменников:

1) Возможность работы со сложными (с точки зрения теплообмена) теплоносителями – воздухом и высоковязкими жидкостями.

2) Большая поверхность теплоотдачи со стороны сложного (с точки зрения теплообмена) теплоносителя при высокой компактности теплообменного аппарата.

3) Возможность использования в качестве хладагента воздуха, что экономически выгодно, поскольку позволяет сэкономить на более дорогой, чем воздух, водооборотной воде.

Недостатки оребренных теплообменников:

1) Для изготовления пластин-оребрений требуется материал с высокой теплопроводностью (сталь подходит не всегда, зачастую используется алюминий или медь).

2) Теплообменники воздушного охлаждения всё же существенно более громоздки, чем теплообменники для охлаждения водой.

4.8. Пластинчатые теплообменники

Устройство и принцип работы

Пластинчатые теплообменники относятся к подклассу теплообменников с плоской поверхностью теплопередачи. Поверхностью теплопередачи в этих теплообменниках являются гофрированные параллельные пластины (рис. 39), которые установлены в раму и стянуты в пакет. Все пластины в пакете одинаковы, только развернуты одна за другой на 180°, поэтому при стягивании пакета пластин образуется система узких волнистых каналов (рис. 40) шириной 3÷6 мм, по которым и протекают теплоносители. Такая установка пластин обеспечивает чередование горячих и холодных каналов (рис. 41). В процессе теплообмена жидкости движутся навстречу друг другу (в противотоке). В местах их возможного перетекания находится либо стальная пластина, либо двойное резиновое уплотнение, что практически исключает смешение жидкостей.

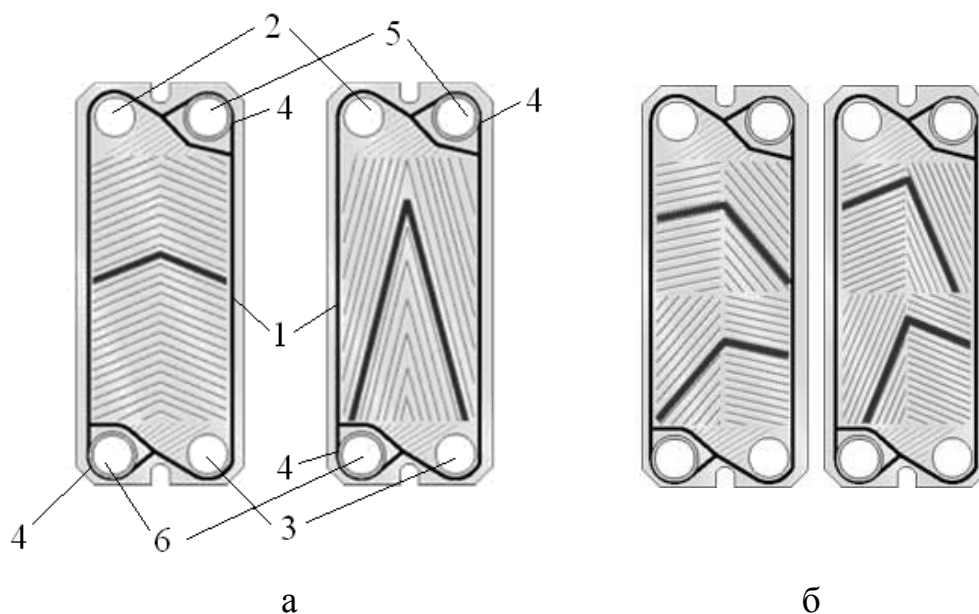


Рис. 39. Гофрированные пластины пластинчатых теплообменников:
а – обычные (симметричные) пластины; б – пластины с рисунком «асимметричная ёлочка»;
1 – прокладка, ограничивающая пространство первого теплоносителя; 2, 3 – отверстия для
входа и выхода первого теплоносителя; 4 – прокладка, ограничивающая пространство
второго теплоносителя; 5, 6 – отверстия для прохода второго теплоносителя



Рис. 40. Характер движения потока жидкости в канале, образованном двумя соседними гофрированными пластинами

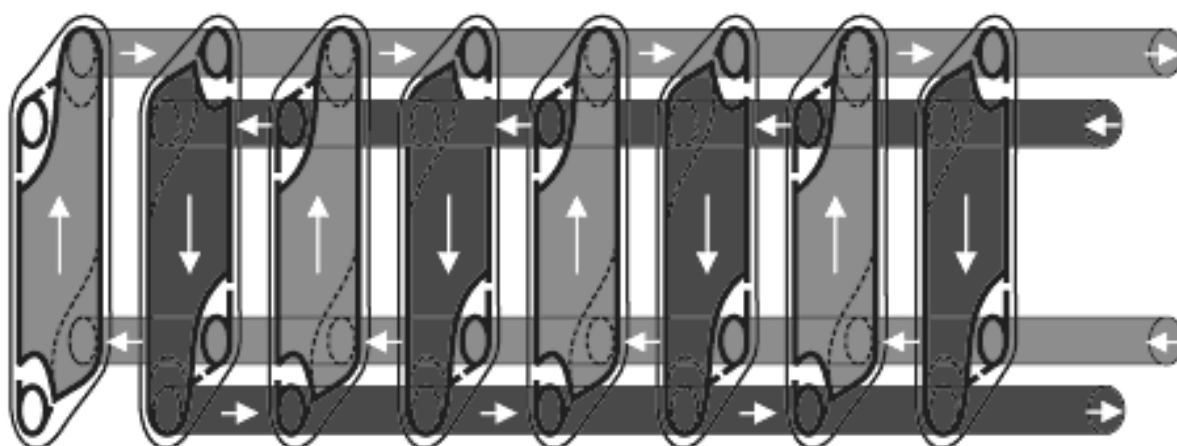


Рис. 41. Схема движения теплоносителей в пластинчатом теплообменнике

Разборный пластинчатый теплообменник (рис. 42) представляет собой пакет гофрированных пластин, зажатый в специальном станке, подобном тому, что используется для рамного фильтр-пресса. Сжатие пакета пластин в станке, состоящем из подвижной плиты 8 и неподвижной плиты, направляющих стержней 7 и 13, стойки 9 и стяжного винтового устройства 10, обеспечивает плотное прилегание прокладок между пластинами 6. Теплоноситель I поступает через штуцер 12 и движется по проходу 15, образованному отверстиями в пластинах. Продвигаясь по проходу, теплоноситель I распределяется по нечётным каналам (считая слева направо), образованным гофрированными пластинами 6. Отработанный теплоноситель I собирается в проход 4, и по нему направляется к выходному штуцеру 2. Теплоноситель II, поступаая через штуцер 1 и двигаясь по проходу 5, распределяется по чётным каналам. Отработанный теплоноситель II собирается в проход 14 и по нему направляется к выходному штуцеру 11.

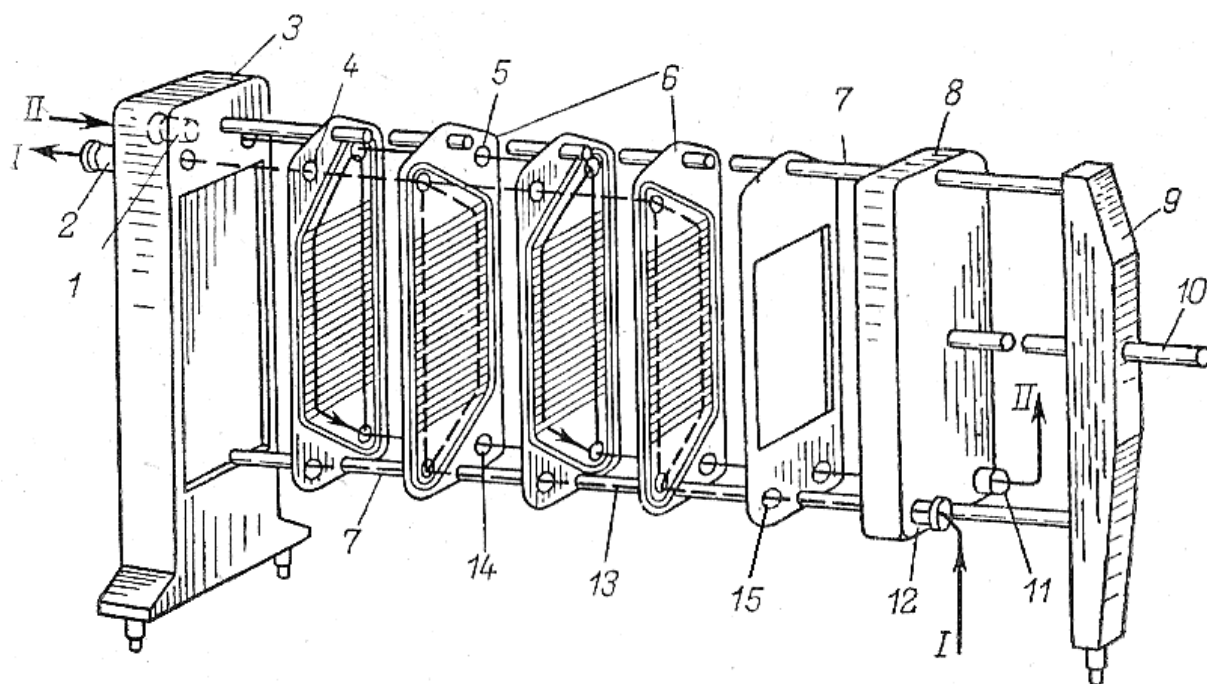


Рис. 42. Разборный пластинчатый теплообменник «фильтр-прессного» типа:

- 1 – штуцер ввода теплоносителя II; 2 – штуцер вывода теплоносителя I; 3 – неподвижная плита; 4 – проход для движения отработанного теплоносителя I; 5 – проход для движения свежего теплоносителя II; 6 – гофрированные пластины; 7 – верхний направляющий стержень; 8 – подвижная плита; 9 – неподвижная стойка; 10 – стяжное винтовое устройство; 11 – проход для движения отработанного теплоносителя II; 12 – штуцер ввода теплоносителя I; 13 – нижний направляющий стержень; 14 – проход для движения отработанного теплоносителя II; 15 – проход для движения свежего теплоносителя I

На рис. 43 представлены разборные пластинчатые теплообменники. Такие аппараты достаточно просты в изготовлении, их легко разбирать для чистки и ремонта. Однако герметизация пластин представляет серьёзную проблему, поэтому они не могут работать при высоких давлениях. Эта проблема практически исчезает в сварных или паяных пластинчатых теплообменниках (рис. 44), однако последние являются неразборными, а значит, затруднены их чистка и ремонт. Применяют также полуразборные пластинчатые теплообменники, где пластины сварены попарно. В полуразборных теплообменниках для одного теплоносителя возможно создание более высокого давления, но затруднена чистка его пространства, а пространство второго доступно для чистки, но его давление ограничено.

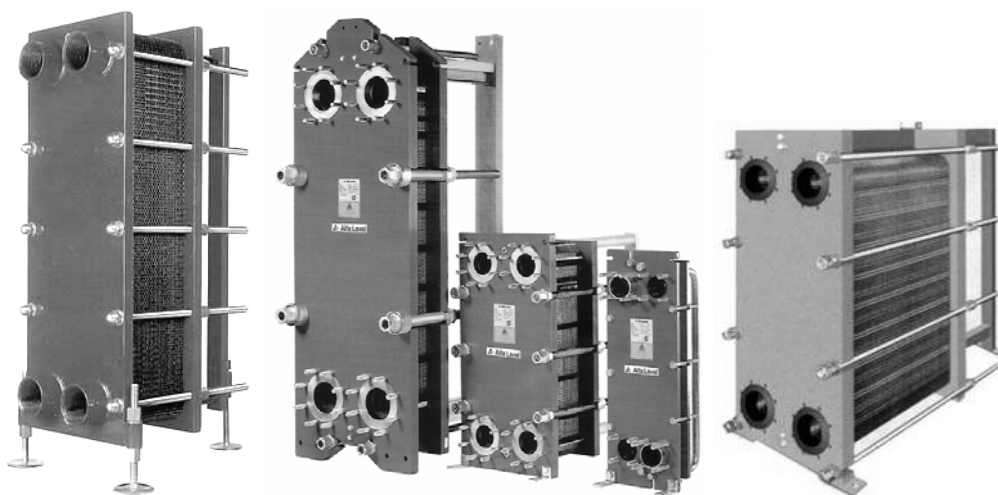


Рис. 43. Внешний вид разборных пластинчатых теплообменников

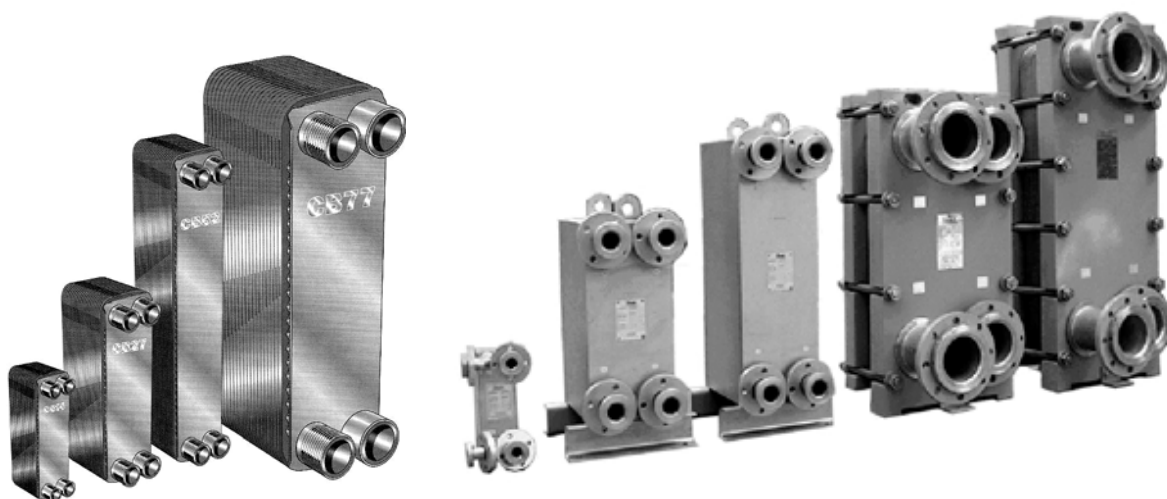


Рис. 44. Внешний вид неразборных (сварных) пластинчатых теплообменников

Одно из существенных преимуществ пластинчатых теплообменников перед другими видами теплообменных аппаратов заключается в возможности различных схем пакетной компоновки пластин. Пакетом в данном случае названа группа пластин, образующих систему параллельных каналов, в которых данный теплоноситель движется только в одном направлении (сверху вниз или наоборот). Пакет по существу аналогичен одному ходу по трубам в многоходовых кожухотрубчатых теплообменниках. На рис. 45 даны примеры различных схем компоновки. При заданном расходе теплоносителя увеличение числа пакетов приводит к увеличению скорости теплоносителя, что интенсифицирует теплоотдачу, но увеличивает гидравлическое сопротивление. В условном обозначении схему компоновки число слагаемых в числителе соответствует числу

пакетов для горячего теплоносителя, в знаменателе – для холодного. Каждое слагаемое означает число параллельных каналов в пакете.

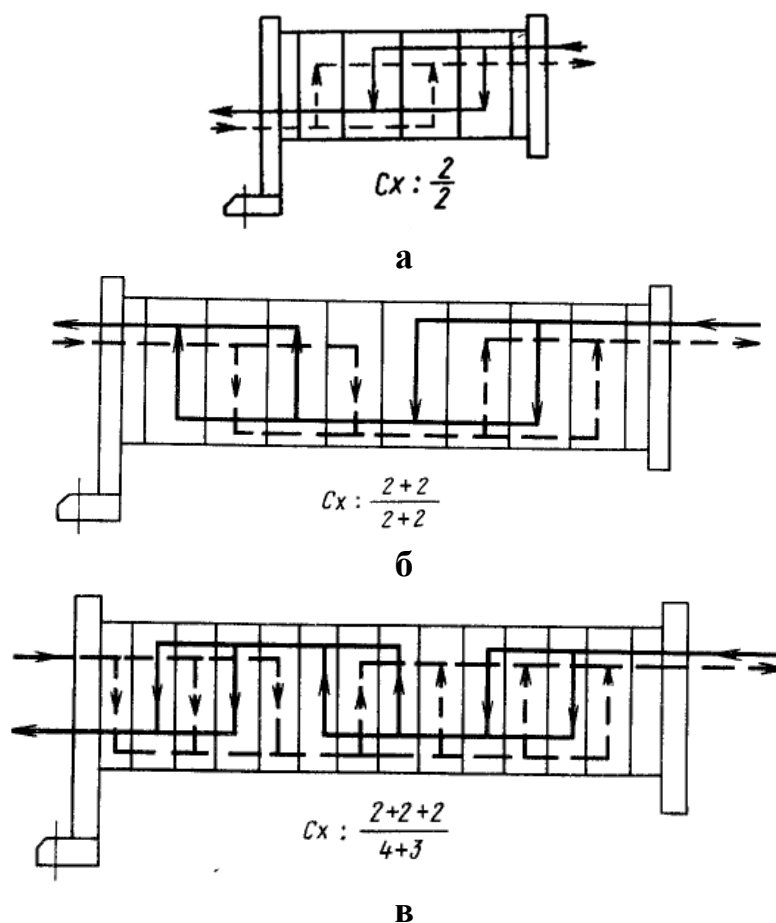


Рис. 45. Примеры компоновки пластин в пластинчатых теплообменниках:
 а – однопакетная схема; б – симметричная двухпакетная схема;
 в – несимметричная схема (три пакета для горячего теплоносителя, два – для холодного)

Достоинства пластинчатых теплообменников:

1) Пластинчатые теплообменники компактны (в 4÷8 раз меньше по габаритным размерам равных по площади поверхности теплопередачи кожухотрубчатых теплообменников).

2) Пластинчатые теплообменники обеспечивают высокий коэффициент теплопередачи 3000÷4000 Вт/(м²·К) (что более чем в 3 раза выше, чем в кожухотрубчатых), благодаря высокой скорости теплоносителей в каналах (1÷3 м/с), при сравнительно невысоких для таких скоростей гидравлических сопротивлениях.

3) Разборные пластинчатые теплообменники удобны для обслуживания, чистки и ремонта.

4) Возможность различных схем компоновки пластин, что позволяет подобрать оптимальный режим работы при заданных расходах теплоносителей.

Недостатки пластинчатых теплообменников:

1) Невозможность работы при высоких давлениях из-за недостаточной герметичности прокладок у разборных пластинчатых теплообменников и опасности деформации пластин у сварных (разборные теплообменники работают при давлениях до 1 МПа, сварные – до 4 МПа).

2) Проблема обслуживания сварных пластинчатых теплообменников – чистка и ремонт затруднены.

4.9. Спиральные теплообменники

Устройство и принцип работы

В спиральных теплообменниках (рис. 46) поверхность теплообмена образована двумя длинными металлическими листами 1 и 2, свёрнутыми по спирали. Внутренние концы листов приварены к глухой перегородке 3. Между листами образованы два изолированных друг от друга спиральных канала прямоугольного сечения шириной 2÷12 мм. По каналам противотоком движутся теплоносители I и II. Иногда ширину канала фиксируют дистанционной полосой (штифтом) 7, которая обеспечивает одинаковое по всей длине каналов расстояние между листами, а также способствует упрочнению конструкции аппарата в целом. С торцов аппарат закрыт плоскими крышками 4 с уплотняющей прокладкой 6 между крышками и листами, изготавливаемая из резины, паронита, асбеста или мягкого металла. Крышки крепят болтами к фланцам 5. Штуцера для ввода и вывода теплоносителей крепятся на крышки и возле наружных концов свёрнутых в спираль листов. Спиральные теплообменники могут быть установлены как вертикально (рис. 46), так и горизонтально (рис. 47).

Спиральные теплообменники бывают разборными и неразборными сварными. Сварные теплообменники дешевле, но они не обладают таким преимуществом как возможность разборки, из-за чего затруднена их очистка.

Достоинства спиральных теплообменников:

1) Спиральные теплообменники компактны, обеспечивают большую площадь поверхности теплоотдачи (до 100 м^2) при относительно небольших габаритных размерах.

2) Спиральные теплообменники обеспечивают высокий коэффициент теплопередачи, благодаря высокой скорости теплоносителей в каналах ($1\div 2 \text{ м/с}$), при сравнительно невысоких для таких скоростей гидравлических сопротивлениях.

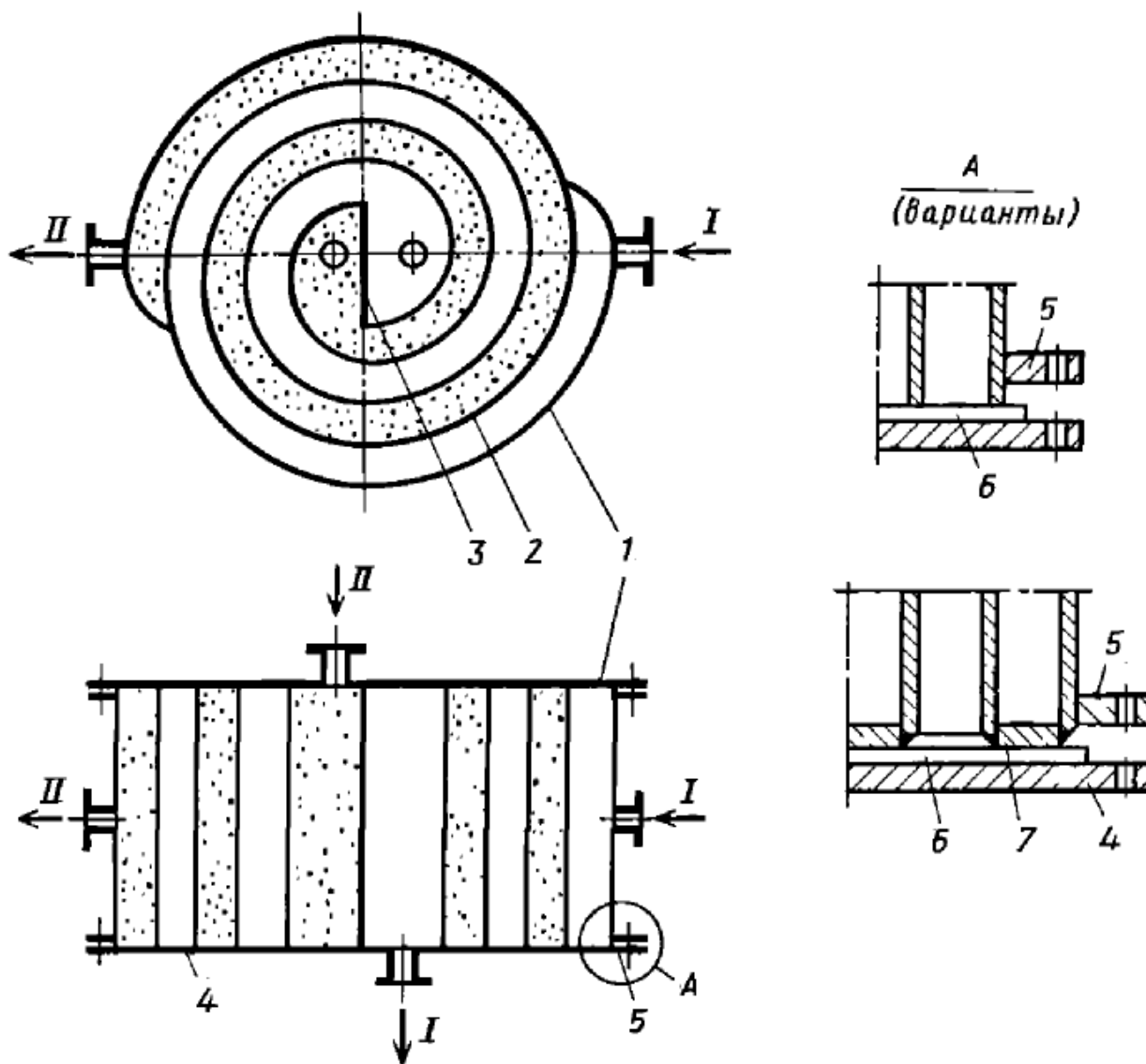


Рис. 46. Схема устройства вертикального спирального теплообменника:

- 1, 2 – металлические листы; 3 – пластина-перегородка; 4 – крышки;
- 5 – фланцы; 6 – прокладка; 7 – дистанционная полоса;
- I, II – теплоносители



Рис. 47. Внешний вид горизонтального спирального теплообменника

Недостатки пластинчатых теплообменников:

- 1) Невозможность работы при высоких давлениях (не более 1 МПа) из-за недостаточной герметичности прокладок.
- 2) Сложны в изготовлении.

4.10. Аппараты с двойными стенками (рубашками)

Устройство и принцип работы

Теплообменные аппараты с рубашками (рис. 48) используются в химической технологии как обогреваемые или охлаждаемые сосуды для проведения химических реакций. Как правило, они работают под избыточным давлением и в зависимости от характера технологического процесса носят название автоклавов, нитраторов, полимеризаторов, варочных аппаратов и др.

На рис. 48 представлен аппарат с греющей рубашкой. Корпус 1 аппарата снабжён с наружной стороны рубашкой 2, в которую сверху подаётся пар. К корпусу рубашку крепят с помощью сварки или болтами (шпильками). В случае, когда рубашка приварена, её очистка и ремонт затруднены.

Достоинства аппаратов с рубашками:

- 1) Удобство доступа к внутренней поверхности аппарата для её очистки.
- 2) Простота устройства.

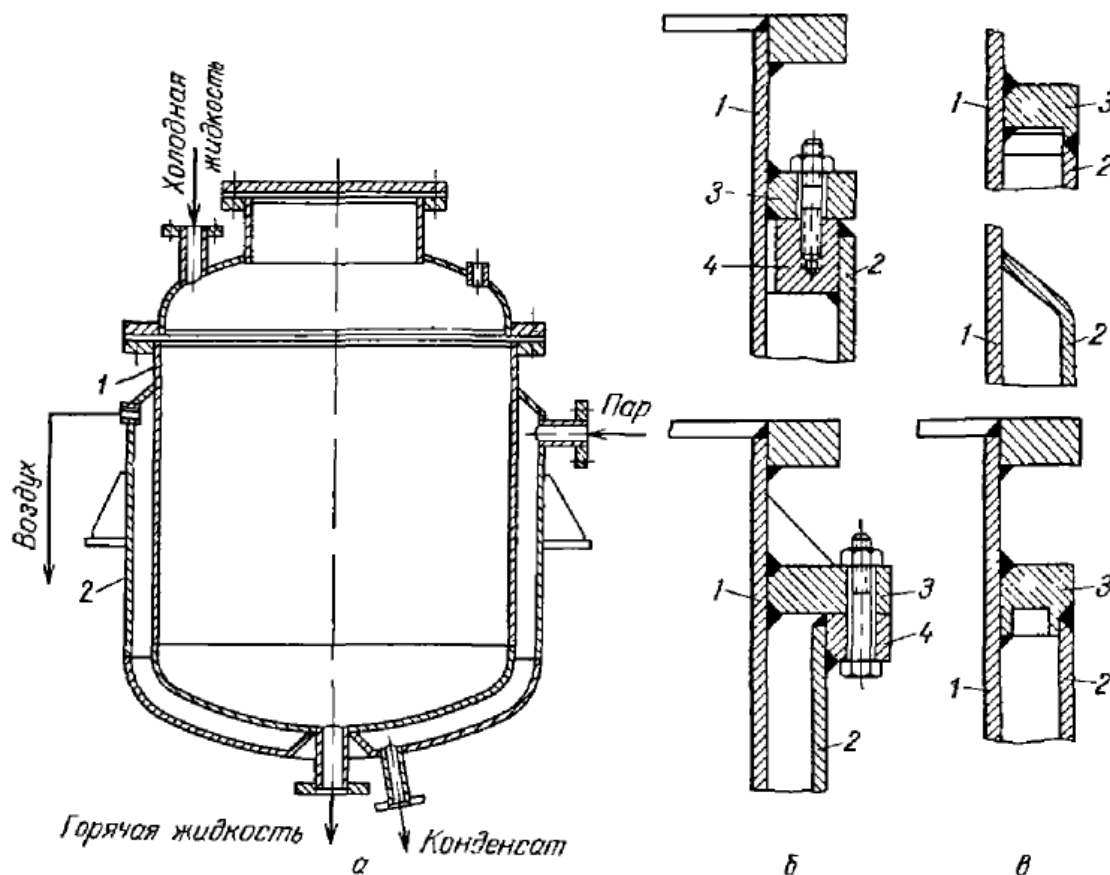


Рис. 48. Аппарат с греющей рубашкой (а) и способы её присоединения (б – фланцевое, в – сварное):

1 – корпус аппарата; 2 – греющая рубашка; 3 – кольца; 4 – фланцы

Недостатки аппаратов с рубашками:

- 1) Небольшая поверхность теплопередачи (менее 15 м^2).
- 2) Ограниченность давления в рубашке (до 1 МПа) вследствие того, что стенка рубашки может деформироваться под действием высоких давлений.
- 3) Низкий коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны корпуса аппарата, для повышения которого необходимо осуществлять перемешивание с помощью мешалок или барботажем сжатого воздуха или пара.
- 4) Невысокий коэффициент теплоотдачи в рубашке, в том случае, если нагрев или охлаждение осуществляется жидким теплоносителем, поскольку площадь сечения потока в рубашке достаточно велика, а скорость теплоносителя в итоге низка (проблемы не возникает в случае обогрева конденсирующимся паром).

4.11. Блочные теплообменники

Устройство и принцип работы

Блочные теплообменники часто называют графитовыми, поскольку большинство блочных теплообменников, применяемых в химической технологии, изготовлено из этого материала. Реже встречаются блочные теплообменники из других материалов, например, из фторопласта. Однако все другие материалы, не уступающие графиту по химической стойкости и, вместе с тем, имеющие достаточную теплопроводность, существенно более дороги.

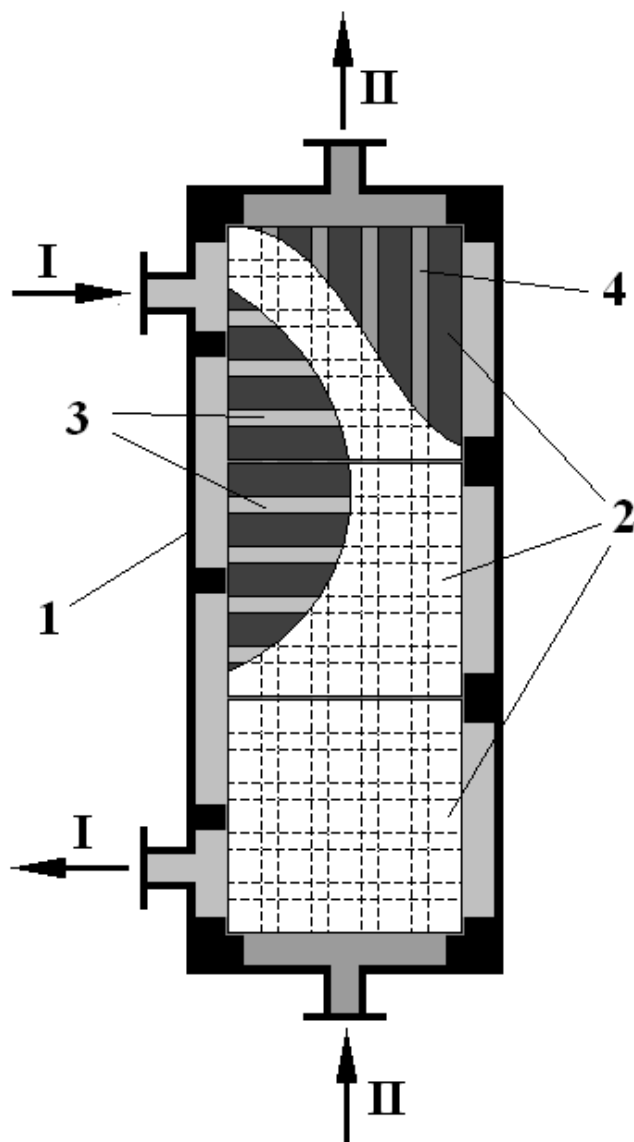


Рис. 49. Схема устройства блочного теплообменника:
1 – корпус аппарата; 2 – графитовые блоки; 3 – горизонтальные каналы; 4 – вертикальные каналы; I, II – теплоносители

Основным элементом блочного теплообменника (рис. 49) является блок 2, имеющий форму параллелепипеда, в котором просверлены вертикальные 4 и горизонтальные 3 сквозные непересекающиеся отверстия. Теплообменный ап-

парат состоит из одного или нескольких блоков, помещённых в корпус I, который обеспечивает распределение теплоносителей по отверстиям. Теплоноситель II, движущийся по вертикальным каналам-отверстиям, может иметь один или два хода, в зависимости от конструкции крышки и днища. Теплоноситель I, движущийся по горизонтальным каналам-отверстиям, имеет число ходов на единицу большее, чем число блоков в теплообменнике.

Достоинства блочных теплообменников:

1) Химическая стойкость материала теплообменника (чаще всего, графита) позволяет использовать теплообменник для нагрева или охлаждения химически агрессивных жидкостей, когда использование теплообменников из других материалов невозможно.

2) Высокая теплопроводность графита ($92 \div 116 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), благодаря которой значительная толщина стенок между каналами не ухудшает существенно теплопередачу.

Недостатки блочных теплообменников:

1) Блочные теплообменники более громоздки, чем сравнимые по площади поверхности теплопередачи кожухотрубчатые и пластинчатые.

2) Более высокая стоимость блочного теплообменника ограничивает его использование (блочные теплообменники целесообразно использовать только в том случае, если использование других теплообменных аппаратов невозможно из-за химической агрессивности теплоносителей).

4.12. Градирни

Устройство и принцип работы

Одними из самых распространенных смесительных теплообменников являются градирни. Первоначально градирни служили для сгущения (концентрирования) солевого раствора при добыче соли выпариванием. Отсюда происходит и название этих устройств: gradieren (нем.) – сгущать соляной раствор. В настоящее время градирня – это устройство для охлаждения большого количества воды направленным потоком атмосферного воздуха. Иногда градирни называют также охладительными башнями (англ. cooling tower).

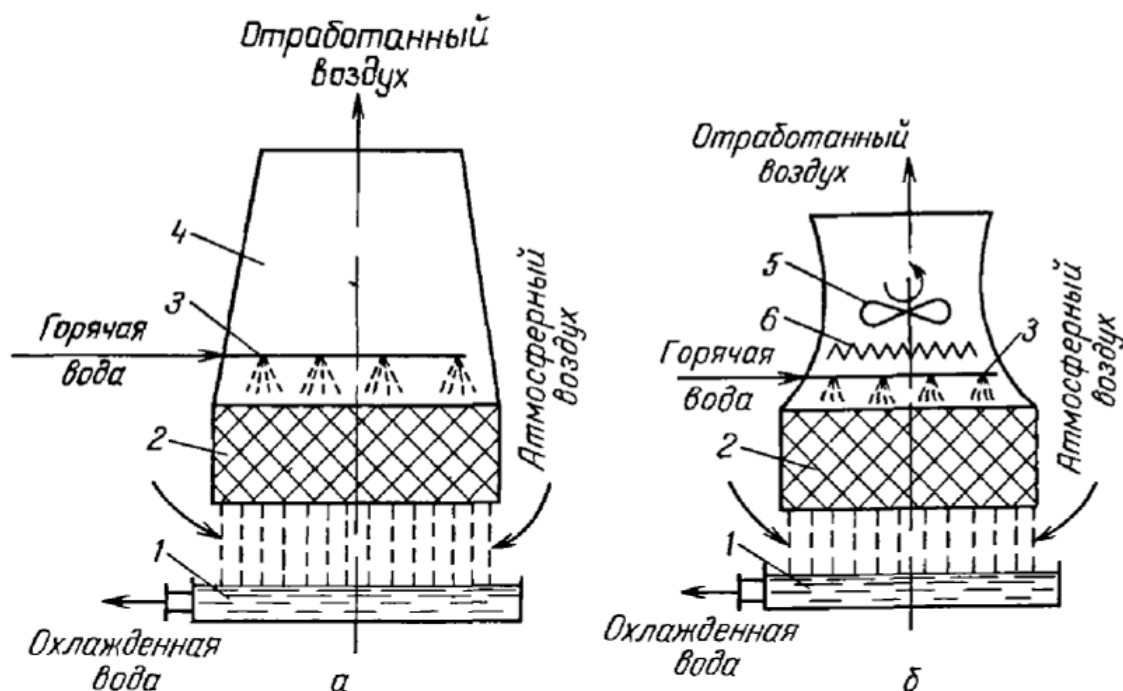


Рис. 50. Градирни с естественной (а) и принудительной (б) тягой:
 1 – поддоны; 2 – слой насадки; 3 – распределители охлаждающей воды;
 4 – полая часть градирни для обеспечения естественной тяги; 5 – осевой вентилятор; 6 – брызгоотбойник

Градирни (рис. 50) представляют собой полые башни, в которых сверху разбрызгивается охлаждаемая вода, а снизу вверх движется воздух. Движение воздуха обеспечивается либо естественной тягой (рис. 50, а), либо, если размеры градирни недостаточны для возникновения тяги, с помощью вентилятора (рис. 50, б). Расположенная внутри градирни насадка 2 служит для увеличения поверхности контакта между водой и воздухом. Вода в градирне охлаждается не столько за счёт передачи тепла более холодному воздуху, сколько за счёт испарительного охлаждения – охлаждения большей части воды за счёт испарения меньшей её части. Так испарение 1 % воды приводит к охлаждению остальной части воды примерно на 5,5 °С.

Наиболее широко градирни используются в водооборотных циклах химических предприятий (рис. 16), где служат для охлаждения отработанной воды, после которого вода может быть повторно использована как хладагент, что значительно сокращает расходы на водоподготовку.

Достоинства градирен:

- 1) Низкая стоимость процесса охлаждения (благодаря тому, что в качестве хладагента выступает воздух).
- 2) Простота конструкции.

- 3) Относительно невысокая стоимость обслуживания.
- 4) Большая производительность по охлаждаемой воде.

Недостатки градирен:

- 1) Громоздкость конструкции (особенно у градирен с естественной тягой).
- 2) Невосполнимые потери воды вследствие испарения.
- 3) Небольшая глубина охлаждения (в градирне вода охлаждается не более чем на 15–20 градусов от своей первоначальной температуры).

4.13. Барометрические конденсаторы

Устройство и принцип работы

К смесительным теплообменным аппаратам относятся конденсаторы смешения, предназначенные для конденсации паров путём их непосредственного контакта с жидкостью (чаще всего водой). Барометрические конденсаторы, помимо конденсации паров и охлаждения неконденсирующихся газов, обеспечивают поддержание вакуума в системе. Барометрические конденсаторы применяют для создания вакуума в аппаратах с паровой фазой, в частности в выпарных установках.

Наиболее распространёнными являются противоточный барометрический конденсатор с перфорированными полками (рис. 51, а) и противоточный барометрический конденсатор с кольцевыми полками (рис. 51, б). В этих аппаратах пар вводят в корпус конденсатора 1, где по полкам 2 каскадно перетекает охлаждающая вода, образуя многочисленные завесы на пути пара. При контакте с водой пар конденсируется, возникающее при этом уменьшение объёма создаёт разрежение в корпусе барометрического конденсатора. Разрежение поддерживается с помощью столба жидкости в барометрической трубе 3, этот столб компенсирует атмосферное давление, действуя по тому же принципу, что и трубка Торричелли (ртутный барометр). Барометрическая трубка вместе с ёмкостью 4 образует гидрозатвор, препятствующий проникновению наружного воздуха в аппарат. Из ёмкости 4 воду удаляют в линию оборотной воды или в канализацию. Несконденсировавшийся воздух, попавший в аппарат вместе с паром или

охлаждающей водой, пропускают через ловушку 5, где отделяют от брызг, и откачивают вакуум-насосом.

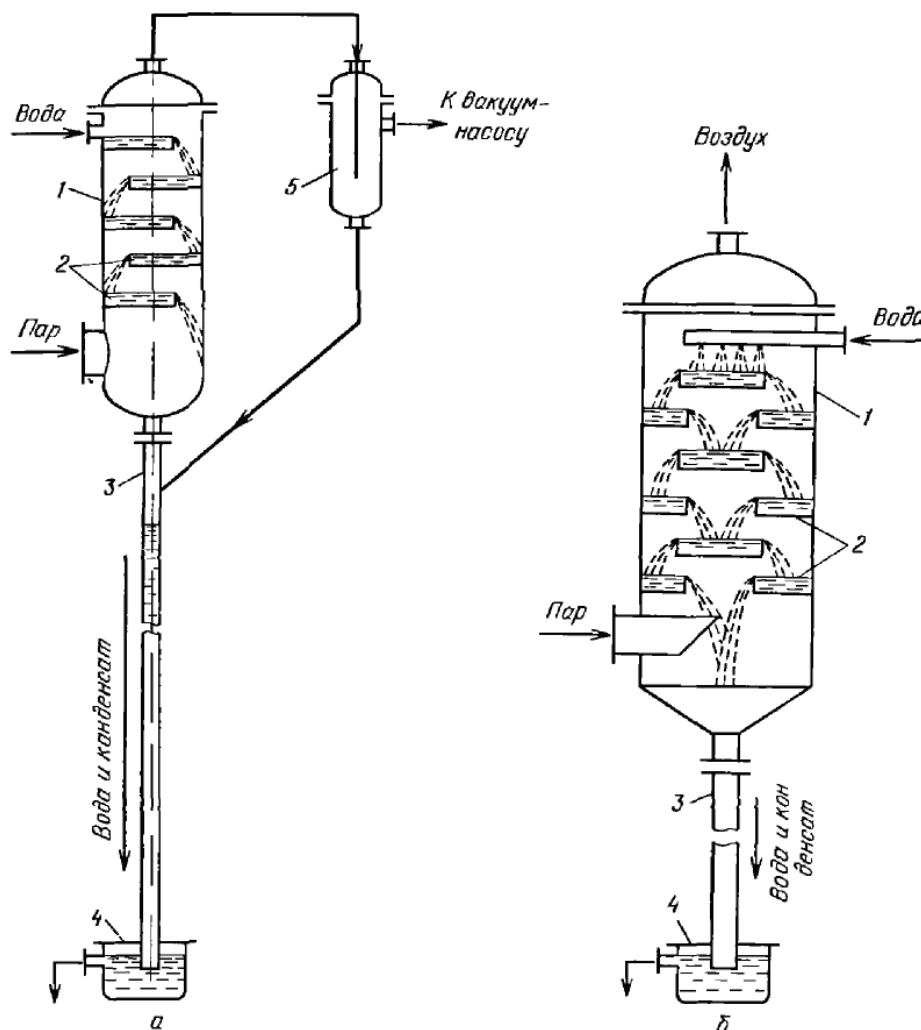


Рис. 51. Противоточный барометрический конденсатор с перфорированными полками (а) и противоточный барометрический конденсатор с кольцевыми полками (б):
1 – корпус; 2 – полки; 3 – барометрическая труба; 4 – ёмкость; 5 – ловушка

Достоинства барометрических конденсаторов:

1) Высокая интенсивность процесса благодаря непосредственному контакту между конденсирующимся паром и охлаждающей водой.

2) Простота конструкции по сравнению с поверхностными конденсаторами.

Недостатки барометрических конденсаторов:

1) Использование возможно, только если допустимо смешение парового конденсата и охлаждающей воды.

4.14. Регенеративные теплообменники

Устройство и принцип работы

Регенеративные теплообменники периодического действия (рис. 52) обычно состоят из двух аппаратов цилиндрической или прямоугольной формы, корпуса которых заполнены насадкой в виде свёрнутой в спираль гофрированной металлической ленты, кирпича, кусков шамота, листового металла и других материалов. Эта насадка нагревается, аккумулируя тепло, при соприкосновении с горячим теплоносителем, и отдаёт накопленное тепло, соприкасаясь с холодным теплоносителем.

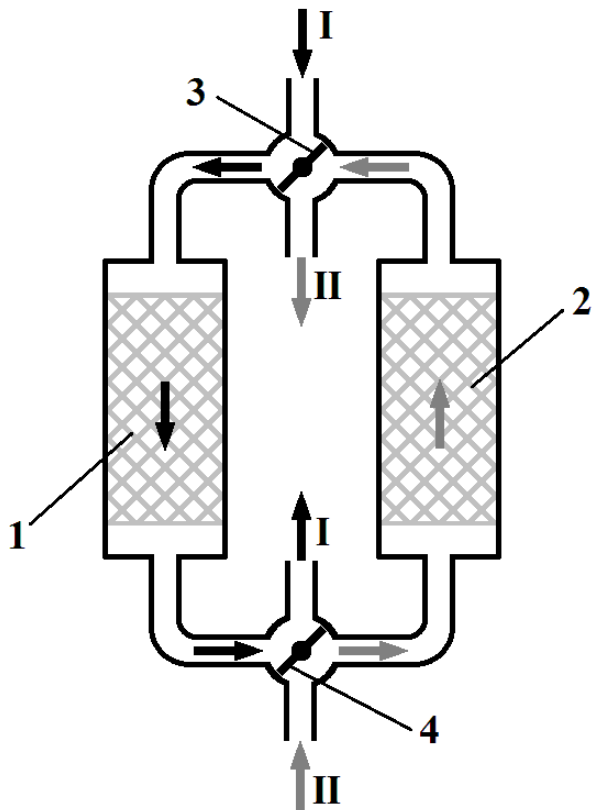


Рис. 52. Схема устройства регенеративных теплообменников с неподвижной насадкой: 1, 2 – регенеративные теплообменники с насадкой; 3, 4 – клапаны; I, II – теплоносители

Цикл работы каждого из аппаратов состоит из двух периодов: периода нагрева насадки и периода её охлаждения. В то время как в первом аппарате происходит нагрев насадки путём пропускания через неё горячего теплоносителя, во втором аппарате насадка охлаждается, отдавая тепло проходящему через неё холодному теплоносителю. Затем с помощью клапанов происходит переключение аппаратов, теперь в первый аппарат поступает холодный теплоноситель, контактируя с нагретой в предыдущем периоде насадкой, а во второй

аппарат – горячий теплоноситель, нагревая остывшую насадку. Таким образом, в целом установка работает непрерывно, благодаря автоматическому переключению потоков.

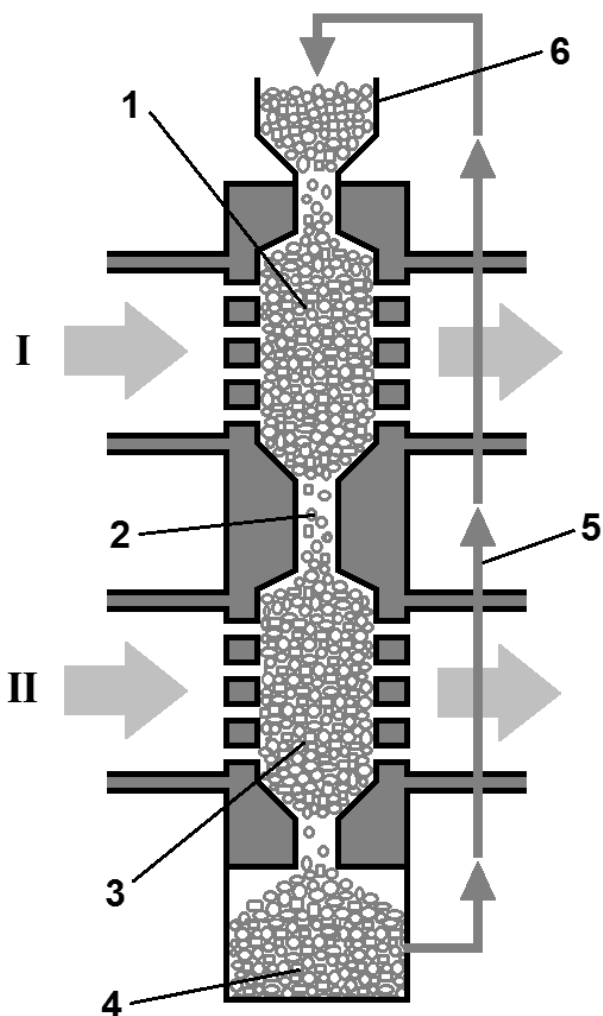


Рис. 53. Схема устройства регенеративных теплообменников с подвижной насадкой: 1 – камера нагрева насадки; 2 – переток насадки между камерами; 3 – камера охлаждения насадки; 4 – сборник охлажденной насадки; 5 – транспортер (элеватор) насадки; 6 – бункер охлажденной насадки; I – теплогент; II – хладагент

Другой тип регенераторов – это регенераторы непрерывного действия с подвижной насадкой. Подвижная насадка может представлять собой слой зернистого материала. Такая насадка движется под собственным весом через аппарат, состоящий из двух последовательно расположенных камер (рис. 53). Проходя через верхнюю камеру 1 слой насадки нагревается, аккумулируя тепло горячего теплоносителя, а при проходе насадки через нижнюю камеру 3 накопленное тепло отдаётся холодному теплоносителю. Остывшая насадка попадает в сборник 4, откуда элеватором 5 переносится в бункер 8, из которого дозирующим устройством вновь подаётся в верхнюю камеру.

Достоинства регенеративных теплообменников:

- 1) Простота устройства.
- 2) Возможность работы со значительными количествами теплоносителей.
- 3) Относительно невысокая стоимость обслуживания.
- 4) Возможность работы при высоких температурах (например, с дымовыми газами доменных печей).

Недостатки регенеративных теплообменников:

- 1) Громоздкость конструкции.
- 2) Необходима значительная разница температур теплоносителей, чтобы движущая сила процесса теплопередачи была достаточной на обеих стадиях процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 10-е изд. стереотип., доработ. Перепеч. с изд. 1973 г. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.
2. Фраас А., Оцисик М. Расчёт и конструирование теплообменников. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1971. 358 с.
3. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Часть 1. М.: Химия, 1992. 419 с.
4. Плановский А. Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Госхимиздат, 1962. 844 с.
5. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Книга 1. М.: Химия, 1981. 812 с.
6. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Книга 1/ В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов, В. В. Захаренко, Т. В. Зиновкина, А. Л. Таран, А. Е. Костанян. М.: Химия, 1999. 888 с.
7. Ульянов Б. А., Бадеников В. Я., Ликучёв В. Г. Процессы и аппараты химической технологии в примерах и задачах. Ангарск: Издательство АГТА, 2006. 743 с.
8. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. Пер. с нем. М.: Техносфера, 2007. 656 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕПЛАГЕНТЫ	5
1.1. Дымовые газы	7
1.2. Водяной пар	11
1.3. Пары высокотемпературных органических теплоносителей	20
1.4. Пары металлов	21
1.5. Вода как теплоагент	22
1.6. Минеральные масла	25
1.7. Высокотемпературные органические теплоносители	26
1.8. Ионные высокотемпературные теплоносители	28
1.9. Кремнийорганические высокотемпературные теплоносители	28
1.10. Жидкометаллические теплоносители	29
2. НАГРЕВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ	31
2.1. Нагрев электрическим сопротивлением	31
2.2. Электроиндукционный нагрев	33
2.3. Высокочастотный диэлектрический нагрев	34
2.4. Электродуговой нагрев	34
3. ХЛАДАГЕНТЫ	36
3.1. Воздух	37
3.2. Вода как хладагент	39
3.3. Холодильные рассолы	42

3.4. Аммиак как хладагент.....	43
3.5. Фреоны (хладоны).....	45
4. ТЕПЛООБМЕННИКИ	47
4.1. Кожухотрубчатые теплообменники.....	49
4.2. Элементные (секционные) теплообменники.....	57
4.3. Двухтрубчатые теплообменники.....	58
4.4. Оросительные теплообменники.....	60
4.5. Погружные теплообменники	61
4.6. Теплообменники с наружными змеевиками	63
4.7. Оребрѐнные теплообменники	64
4.8. Пластинчатые теплообменники.....	68
4.9. Спиральные теплообменники	73
4.10. Аппараты с двойными стенками (рубашками)	75
4.11. Блочные теплообменники	77
4.12. Градирни	78
4.13. Барометрические конденсаторы	80
4.14. Регенеративные теплообменники.....	82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	85

Учебное издание

ДМИТРИЕВ Евгений Александрович
МОРГУНОВА Елена Павловна
КОМЛЯШЁВ Роман Борисович

**ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Редактор Е. В. Копасова

Подписано в печать 25.10.2013 г. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 5,1. Уч.-изд. л. 5,4. Тираж 500 экз. Заказ

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Издательский центр

Адрес университета и Издательского центра
125047 г. Москва, Миусская пл., 9.