

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Инженерно-физический факультет

Ю.А. Гужель

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Учебное пособие. Часть 2. Тепловые процессы и аппараты

Благовещенск

2020

ББК 35

Г 93

Печатается по решению

редакционно-издательского совета

инженерно-физического факультета

Амурского государственного

университета

Гужель Ю.А.

Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие. Часть вторая. Тепловые процессы и аппараты / Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2020. – 65 с.

В учебном пособии рассмотрены основные закономерности протекания тепловых процессов, рассмотрены механизмы переноса тепла – теплопроводность, тепловое излучение и конвекция. Приведена характеристика основных способов подвода тепла к химической аппаратуре и отвода тепла от нее. Представлены конструкции основных типов теплообменных аппаратов – кожухотрубчатых, пластинчатых, аппаратов воздушного охлаждения. Рассмотрен теплообмен, протекающий в трубчатых печах, дана характеристика показателей работы печей. Рассмотрен процесс выпаривания и основные типы выпарных аппаратов. Пособие может быть использовано при написании конспектов лекций и подготовке к практическим занятиям.

В авторской редакции

Рецензенты: И.В. Бибик, доцент кафедры техносферной безопасности и природообустройства Дальневосточного ГАУ
Н.А. Фролова, к.т.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности АмГУ.

© Амурский государственный университет,
2020

© Гужель Ю. А., автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОТЫ.....	4
1.1 Общая характеристика тепловых процессов	4
1.2 Механизмы теплопереноса	6
1.3 Движущая сила тепловых процессов	10
ГЛАВА 2 ПРОМЫШЛЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОДВОДА/ОТВОДА ТЕПЛОТЫ	13
2.1 Подвод теплоты	13
2.1.1 Нагревание водяным паром и парами высокотемпературных теплоносителей	13
2.1.2 Нагревание горячими жидкостями	16
2.1.3 Нагревание топочными газами	17
2.2 Отвод теплоты	18
ГЛАВА 3 ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ	21
3.1 Основные виды кожухотрубчатых теплообменников	23
3.2 Пластинчатые теплообменники	33
3.3 Аппараты воздушного охлаждения	35
3.4 Теплообменные аппараты смешения	38
ГЛАВА 4 ТРУБЧАТЫЕ ПЕЧИ	43
4.1 Теплообмен в трубчатой печи	43
4.2 Основные показатели работы трубчатых печей	48
4.3 Основные типы печей	50
ГЛАВА 5 ВЫПАРИВАНИЕ	58
5.1 Сущность процесса выпаривания	58
5.2 Основные типы выпарных аппаратов	59

ГЛАВА 1 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОТЫ

1.1 Общая характеристика тепловых процессов

Теплопередача – наука о самопроизвольном переносе тепла от тел с большей температурой к телам с меньшей температурой. В узком смысле, теплопередача – это перенос тепла от одной среды к другой через разделяющую их твердую теплопроводящую поверхность.

Оба вещества, участвующие в теплопередаче, называют теплоносителями.

Процессы, скорость которых определяется скоростью отвода или подвода тепла, являются тепловыми, к ним относятся нагревание, охлаждение, конденсация, испарение.

Нагревание – повышение температуры перерабатываемых материалов путем подвода к ним тепла.

Охлаждение – понижение температуры перерабатываемых материалов путем отвода от них тепла.

Конденсация – сжижение паров какого-либо вещества путем отвода от них тепла.

Испарение – перевод в парообразное состояние какой-либо жидкости путем подвода к ней тепла. Частным случаем испарения является широко распространенный в химической технике процесс выпаривания – концентрирование при кипении растворов твердых нелетучих веществ путем удаления жидкого летучего растворителя в виде паров.

В химической технике приходится осуществлять тепловые процессы при различных температурах – от близких к абсолютному нулю до равных нескольким тысячам градусов. Для каждого конкретного процесса, протекающего в определенном интервале температур, подбирают наиболее подходящие теплоносители и хладагенты, которые должны быть химически стойкими в рабочих условиях и легко транспортируемыми по трубам, но не должны образовывать отложений на стенках аппаратов и вызывать коррозию аппаратуры.

Самопроизвольный перенос тепла протекает при условии неравенства температур в рассматриваемых точках пространства или данного тела. Величина теплового потока зависит от распределения температур в рассматриваемом объеме или от характера температурного поля. Температурное поле – это совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемой среды. Различают установившийся (стационарный) и неустановившийся (нестационарный) процессы передачи тепла. При стационарном процессе температура не зависит от времени (конвективное изменение температуры). При нестационарном процессе температура изменяется в пространстве и во времени (конвективное и локальное изменение температуры).

Основная характеристика любого теплового процесса – количество передаваемого тепла: от этой величины зависят размеры теплообменных аппаратов. Основным размером теплообменного аппарата является теплопередающая поверхность (поверхность теплообмена).

Связь между количеством передаваемого в аппарате тепла и поверхностью теплообмена определяется основным кинетическим уравнением переноса тепла

$$\frac{dQ}{Sd\tau} = \frac{\Delta t}{R} = K\Delta t \quad (1.1)$$

где Q – количество переданного тепла;

S – поверхность теплообмена;

K – коэффициент теплопередачи (величина, обратная термическому сопротивлению R);

Δt – средняя разность температур между обменивающимися теплом материалами.

Это уравнение, записанное в виде (1.2), обычно называют основным уравнением теплопередачи для установившегося процесса:

$$Q = KS\Delta t_{cp} \quad (1.2)$$

для неустановившегося процесса:

$$Q = KS\Delta t_{cp} \tau \quad (1.3)$$

Согласно уравнениям (1.2) и (1.3), количество тепла, передаваемое от более нагретого к более холодному теплоносителю, пропорционально поверхности теплообмена S , среднему температурному напору Δt_{cp} и времени τ .

Из этих уравнений определяют поверхность теплообмена аппарата:

$$S = \frac{Q}{K\Delta t_{cp}} \quad (1.4)$$

Среднюю разность температур между средами определяют по начальным и конечным температурам сред, участвующих в теплообмене. Коэффициент теплопередачи зависит от характера и скоростей движения теплообменивающихся сред, а также от условий, в которых протекает теплообмен.

1.2 Механизмы теплопереноса

Различают три способа распространения тепла: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. Возможны любые сочетания из трех указанных элементарных видов теплообмена.

При теплопроводности перенос теплоты происходит за счет соударений и диффузии частиц тел, а также квантов упругих колебаний их кристаллических решеток – фотонов – при макроскопической неподвижности всей массы вещества. В наиболее чистом виде теплопроводность можно наблюдать в твердых телах и тонких неподвижных слоях жидкости и газа. В металлах и полупроводниках теплообмен осуществляется за счет соударений и диффузии свободных электронов, а также упругих колебаний кристаллической решетки.

Распространение тепла теплопроводностью происходит при неравенстве температур внутри рассматриваемого тела (среды).

На основании опытного изучения процесса распространения тепла в

твердых телах Фурье установил основной закон теплопроводности, который гласит, что количество тепла dQ , переданного теплопроводностью, пропорционально градиенту температуры dt/dn , времени dt и площади сечения dS , перпендикулярного направлению теплового потока, т.е.

$$Q = -\lambda S \frac{\partial t}{\partial n} \tau \quad (1.5)$$

Коэффициент пропорциональности в этом уравнении называют коэффициентом теплопроводности. Он характеризует способность тел проводить тепло и имеет следующую размерность:

$$\lambda = \left[\frac{Q \partial n}{F \tau \partial t} \right] = \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}} \right] = \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right] \quad (1.6)$$

Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество тепла проходит вследствие теплопроводности через 1 м^2 поверхности в единицу времени при разности температур 1 град, приходящейся на 1 м длины нормали к изотермической поверхности.

Коэффициент теплопроводности веществ зависит от их природы и агрегатного состояния, от температуры и давления.

При конвекции перенос теплоты происходит вместе с переносом вещества за счет свободного или вынужденного макроскопического движения всей его массы. Поэтому конвекция возможна лишь в жидкостях. Свободное движение осуществляется под действием разности плотностей нагретых и холодных частей жидкостей, вынужденное – под действием внешних сил, создаваемых с помощью насосов, компрессоров, вентиляторов и т.п. Теплообмен между твердым телом (например, стенкой трубы) и жидкостью осуществляется конвекцией в массе жидкости, расположенной вдали от стенки, и теплопроводностью с конвекцией через пограничный слой. Такой вид теплообмена в отличие от конвекции называют конвективной теплоотдачей.

В покоящейся жидкости теплообмен осуществляется теплопроводностью, если толщина ее слоя невелика и конвекция неразвита.

С началом движения по мере перехода от малых скоростей ко все большим и от ламинарного режима к турбулентному роль теплопроводности уменьшается, а конвекции – растет.

В зависимости от движущих сил различают свободное движение жидкости, совершающееся под действием разности плотностей нагретых и холодных ее частей, и вынужденное, которое происходит под действием внешних сил, создающихся насосами, компрессорами и вентиляторами. Относительное значение теплопроводности в последнем случае бывает, как правило, меньше.

При теплообмене излучением тела не соприкасаются друг с другом и перенос теплоты между ними при наличии разности температур осуществляется с помощью электромагнитной энергии. Происходит двойное превращение энергии – в теле с температурой T_1 теплота превращается в излучение – носитель электромагнитной энергии, а в теле с температурой T_2 в результате поглощения излучения электромагнитная энергия снова превращается в теплоту.

Основные критерии подобия и их физический смысл:

1. Критерий Грасгофа (критерий подъемной силы):

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \quad (1.7)$$

β – коэффициент объемного расширения, K^{-1} ;

Δt – разность температур в двух точках системы потока и стенки, K

Характеризует гидродинамическое подобие при свободном движении жидкости; отражает соотношение между подъемной силой, заставляющей всплывать нагретые частицы теплоносителя (архимедова сила), и силой вязкостного трения, препятствующей подъему этих частиц. Чем Gr выше, тем свободное движение интенсивнее

2. Критерий Нуссельта (критерий теплоотдачи):

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (1.8)$$

α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К)

Характеризует отношение между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока. Чем Nu выше, тем интенсивнее процесс конвективного теплообмена.

3. Критерий Прандтля (критерий физических свойств жидкости):

$$Pr = \frac{V}{a} \quad (1.9)$$

a – коэффициент температуропроводности, м²/с

Характеризует физические свойства жидкости и способность распространения теплоты в жидкости.

4. Критерий Фурье (безразмерное время):

$$Fo = \frac{\alpha\tau}{l^2} \quad (1.10)$$

τ – время, ч

Характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, физическими константами и размерами тела, являясь мерой скорости изменения температуры при нестационарном режиме.

5. Критерий Эйлера (критерий подобия поля давления):

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \quad (1.11)$$

Δp – перепад давления, Н/м²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³

Характеризует безразмерную величину падения давления при движении теплоносителя по каналу (трубе), т.е. гидродинамическое сопротивление.

6. Коэффициент теплопроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (1.12)$$

Характеризует скорость изменения температуры в каком-либо веществе

при нестационарном режиме.

При решении конкретных задач по найденному из соответствующего уравнения подобия значению критерия Нуссельта легко определяется коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l} \quad (1.13)$$

1.3 Движущая сила тепловых процессов

Движущей силой тепловых процессов является разность температур сред, при наличии которой тепло распространяется от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой. При теплопередаче от одного теплоносителя к другому разность между температурами теплоносителей не сохраняет постоянного значения вдоль поверхности теплообмена, и поэтому в тепловых расчетах, где применяется основное уравнение теплопередачи или к конечной поверхности теплообмена, необходимо пользоваться средней разностью температур Δt_{cp} .

Средняя разность температур зависит от температуры теплоносителей и их взаимного направления. Существуют следующие схемы движения теплоносителей (рисунок 1.1): прямоток, при котором теплоносители движутся в одном и том же направлении; противоток, при котором теплоносители движутся в противоположных направлениях, и перекрестный ток, при котором теплоносители движутся по отношению друг к другу во взаимно перпендикулярных направлениях.

В случае, когда $\frac{\Delta t_n}{\Delta t_k} \leq 2$ используется среднеарифметическая разность температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n + \Delta t_k}{2} \quad (1.14)$$

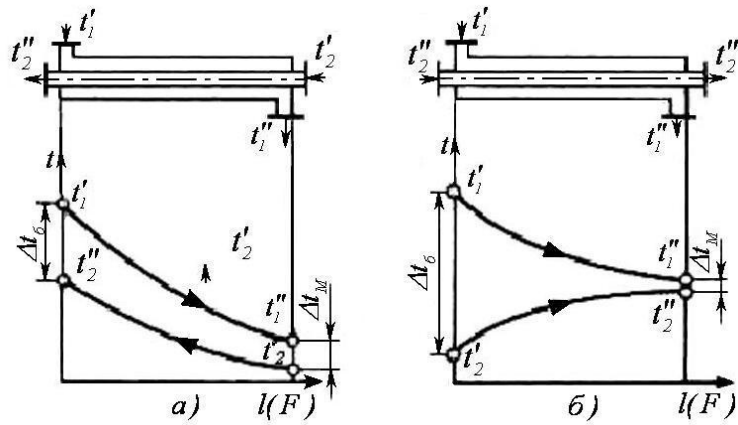


Рисунок 1.1 Схемы движения теплоносителей в теплообменниках:
а – прямоток; б – противоток

В противном случае используется среднелогарифмическая разность температур:

для прямотока

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} \quad (1.15)$$

для противотока

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_m - \Delta t_o}{2,3 \lg \frac{\Delta t_o}{\Delta t_m}} \quad (1.16)$$

Для перекрестного и смешанного токов точный расчет величины Δt_{cp} затруднен ввиду весьма сложных закономерностей изменения температур вдоль поверхности теплообмена. Поэтому расчет движущей силы в этих случаях проводят по упрощенной схеме:

$$\Delta t_{cp} = \varepsilon \Delta t_{cp}^{против} \quad (1.17)$$

где ε – поправочный коэффициент, всегда меньше единицы и находится по справочникам в зависимости от соотношения температур теплоносителей и схемы их движения.

Для интенсификации переноса теплоты через стенку нужно либо увеличить перепад температур между теплоносителями, либо уменьшить

термическое сопротивление теплопередачи. Температуры теплоносителей обусловлены требованиями технологического процесса, поэтому изменить их обычно не удастся.

Термическое сопротивление можно уменьшить различными способами: путем увеличения скорости движения теплоносителя, турбулизации пограничного слоя и т.д. Термическое сопротивление теплопроводности зависит от материала и толщины стенки. Поэтому для интенсификации теплопередачи очень часто ребряют ту поверхность стенки, теплоотдача от которой менее интенсивна. За счет увеличения площади ребренной поверхности стенки термическое сопротивление теплоотдачи с этой стороны стенки уменьшается. Ребра, имеющие форму пластин, стержней или любую другую, одним концом плотно прикрепляют к теплоотдающей поверхности с помощью сварки, пайки или изготавливают как целое со стенкой. Ребристыми выполняют радиаторы отопления, корпуса двигателей и редукторов, радиаторы для охлаждения воды.

ГЛАВА 2 ПРОМЫШЛЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОДВОДА/ОТВОДА ТЕПЛОТЫ

2.1 Подвод теплоты

Проведение многих технологических процессов, осуществляемых в химической аппаратуре, часто бывает связано с необходимостью подвода или отвода теплоты.

Для подвода теплоты применяют различные теплоносители, которые отдают получаемую от источников теплоты энергию в теплообменниках. В качестве прямых источников тепловой энергии на предприятиях химической промышленности используют топочные (дымовые) газы, представляющие собой газообразные продукты сгорания топлива, и электрическую энергию. Вещества (среды), передающие от этих источников теплоту нагреваемой среды через стенку теплообменника, называют промежуточными теплоносителями.

Наиболее распространенными промежуточными теплоносителями являются насыщенный водяной пар, горячая вода, различные высокотемпературные теплоносители – перегретая вода, органические жидкости и их пары, минеральные масла, жидкие металлы и пр.

Выбор теплоносителя определяется величиной температуры нагревания и необходимостью ее регулирования. Теплоноситель, используемый в промышленности, должен обладать высокими значениями плотности, теплоемкости и теплоты парообразования, низкой вязкостью; быть негорючим, нетоксичным, термостойким, обладать низким коррозионным действием, но вместе с тем быть достаточно доступным и дешевым.

2.1.1 Нагревание водяным паром и парами высокотемпературных теплоносителей

Наиболее широко в химической технологии в качестве теплоносителя используют насыщенный водяной пар, при конденсации которого выделяется значительное количество теплоты. Его обычно применяют при давлениях до 1,0-1,2 МПа, что соответствует температурам нагревания до 190 °С.

Преимущества насыщенного пара как теплоносителя: высокий коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке; большое количество теплоты, выделяющейся при конденсации 1 кг пара; равномерность обогрева, поскольку при конденсации пара температура остается постоянной; возможность тонкого регулирования температуры нагревания путем изменения давления пара; возможность передачи пара на большие расстояния (при этом пар должен быть перегрет на 20–30 °С).

Основной недостаток водяного пара, ограничивающий его практическое применение, – это значительное возрастание давления с увеличением температуры. Вследствие этого применение насыщенного пара в случаях, когда необходимо получение высоких температур при низком давлении, затруднительно.

При нагревании насыщенным водяным паром различают «острый» и «глухой» пар. «Острый» пар используют в тех случаях, когда допустимо смешение нагреваемой среды с образующимся при конденсации пара конденсатом.

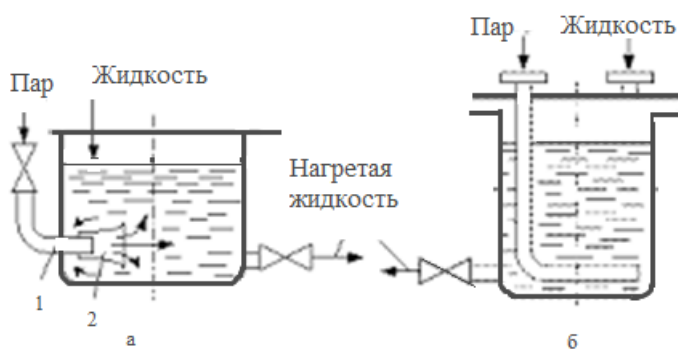


Рисунок 2.1 Устройства для обогрева жидких сред «острым» водяным паром: а – бесшумный сопловой подогреватель; б – паровой барботер

Этот способ нагревания отличается простотой и позволяет лучше использовать энтальпию пара, так как паровой конденсат смешивается с нагреваемой жидкостью, в результате чего их температуры выравниваются. К тому же при вводе острого пара через барботер (трубу закрытую с конца, расположенную у дна аппарата, и снабженную значительным числом мелких отверстий) происходит не только нагревание жидкости, но и интенсивное ее

перемешивание.

Нагревание острым паром в технике используют редко, так как смешение нагреваемой жидкости и конденсата пара обычно недопустимо. Чаще нагревание острым паром осуществляют через стенку.

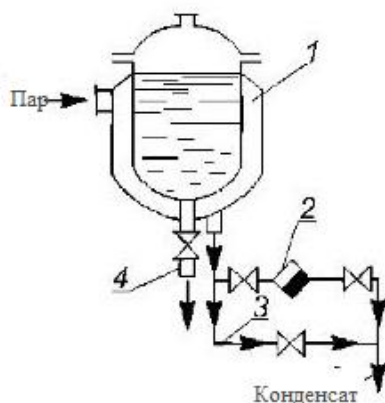


Рисунок 2.2 Схема размещения конденсатоотводчика на аппарате с обогревом «глухим» водяным паром:

1 – паровая рубашка; 2 – конденсатоотводчик; 3 – обводная линия; 4 – патрубок для слива продукта

При этом способе нагревания пар, соприкасаясь с более холодной стенкой, конденсируется на ней, и конденсат в виде пленки стекает по поверхности стенки. Пар практически всегда вводят в верхнюю часть аппарата, а образующийся конденсат отводят из его нижней части через конденсатоотводчик, который обеспечивает, с одной стороны, быстрый и своевременный отвод образующегося в паровом пространстве конденсата, а с другой – препятствует уходу с конденсатом части не успевшего сконденсироваться пара (так называемого пролетного пара), предотвращая его потерю.

Более высокого, чем при конденсации насыщенного водяного пара, уровня температур можно достичь при конденсации паров высокотемпературных органических теплоносителей (ВОТ), основным преимуществом которых является возможность получения высоких рабочих температур при низких давлениях.

2.1.2 Нагревание горячими жидкостями

В химической промышленности при нагревании многих веществ выдвигаются жесткие требования в отношении равномерности нагревания и обеспечения безопасных условий работы, что особенно важно в случаях, когда недопустим даже кратковременный перегрев. В этих случаях для нагревания используют горячие жидкости: горячая (перегретая) вода, минеральные масла, жидкие ВОТ, расплавы солей и металлов.

Схемы обогрева с помощью горячих жидкостей: с естественной или принудительной циркуляцией промежуточного теплоносителя.

Жидкий теплоноситель нагревается в змеевике, обогреваемом в печи, например топочными газами. При нагревании плотность теплоносителя уменьшается и он перемещается по трубопроводу «горячей» ветви к обогреваемому аппарату, где отдает теплоту нагреваемой среде. В процессе теплопередачи температура жидкого теплоносителя снижается, а плотность увеличивается. При этом теплоноситель по трубопроводу «холодной» ветви возвращается в печь для последующего нагревания. Таким образом осуществляется замкнутая естественная циркуляция жидкого промежуточного теплоносителя. Скорость циркуляции составляет примерно 0,1 м/с. Поэтому значения коэффициента теплопередачи и тепловой производительности установок с естественной циркуляцией невелики.

В качестве горячей жидкости в этих установках чаще всего используют перегретую воду или ВОТ. Максимальная температура перегретой воды, соответствующая критическому давлению, равна 374 °С. Среди недостатков использования этого теплоносителя отмечают необходимость применения металлоемкой (толстостенной) аппаратуры и сложной арматуры.

В установках с принудительной циркуляцией горячей жидкости ее перемещение между печью и обогреваемым аппаратом обеспечивается с помощью циркулирующего насоса, что увеличивает скорость до 2–2,5 м/с.

По сравнению с нагреванием перегретой водой обогрев горячими жидкостями проще и экономичнее.

В соответствии с принципом термодинамического подобия высокотемпературных теплоносителей они могут быть разделены на три основные группы: органические; ионные; металлические

К группе ВОТ относятся индивидуальные органические вещества (этиленгликоль, глицерин, нафталин и его производные), продукты хлорирования дифенила и полифенолов и многокомпонентные ВОТ, в том числе ароматизированные и неароматизированные минеральные масла.

Группу ионных высокотемпературных теплоносителей образуют кремнийорганические жидкости (силиконы) и расплавы солей или их смесей.

Среди высокотемпературных теплоносителей жидкие металлы имеют самую высокую термостойкость. Однако они оказывают наибольшее агрессивное воздействие на конструкционные материалы, поэтому верхний температурный предел их применения определяется максимально допустимой температурой коррозионной стойкости материала по отношению к другому теплоносителю. Кроме того, пары металлических теплоносителей крайне ядовиты, поэтому нагревательные установки с их использованием в химической технологии находят ограниченное применение.

2.1.3 Нагревание топочными газами

Топочные газы относятся к числу наиболее давно и широко применяемых теплоносителей, они обеспечивают надежное нагревание до температур 1000–1100 °С.

Наиболее существенными недостатками данного способа являются: неравномерность нагрева, обусловленная охлаждением газа в процессе теплообмена; трудность регулирования температуры обогрева; низкие коэффициенты теплоотдачи; возможность загрязнения нагреваемых материалов продуктами неполного сгорания топлива (при непосредственном обогреве газами).

Нагревание топочными газами производят в трубчатых печах – аппаратах, предназначенных для передачи нагреваемому продукту тепла, выделяющегося при сжигании топлива в топочной камере печи.

Трубчатые печи широко распространены в нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической, коксохимической и других отраслях промышленности, являются составной частью многих установок и применяются в различных технологических процессах (перегонка нефти, мазута, пиролиз, каталитический крекинг, риформинг, гидроочистка, очистка масел и др.)

Трубчатая печь имеет камеры радиации и конвекции. В камере радиации (топочной камере), где сжигается топливо, размещена радиантная поверхность (экран), поглощающая лучистое тепло в основном за счет радиации. В камере конвекции расположены конвекционные трубы, воспринимающие тепло главным образом при соприкосновении дымовых газов с поверхностью нагрева путем конвекции.

Нагреваемый продукт в печи последовательно проходит через конвекционные и радиантные трубы, поглощая тепло. Обычно радиантная поверхность воспринимает большую часть тепла, выделяемого в печи при сгорании топлива.

2.2 Отвод теплоты

Многие процессы химической технологии протекают в условиях, когда возникает необходимость отвода теплоты, например при охлаждении газов, жидкостей или конденсации паров. Охлаждение осуществляют с помощью охлаждающих теплоносителей (охлаждающих агентов) в результате протекающего между ними и охлаждаемой средой теплообмена.

Наиболее доступными и распространенными охлаждающими агентами являются вода и воздух. Но наряду с ними используют и другие теплоносители – низкотемпературные жидкости.

Охлаждение водой используют для достижения температур охлаждаемой среды на уровне 10–30 °С. При этом достигаемая температура охлаждения зависит от начальной температуры воды, которая в зависимости от ее источника может быть прудовой, речной, озерной, артезианской или же оборотной – прошедшей водооборотный цикл промышленных предприятий.

Речная, прудовая и озерная вода в зависимости от времени года имеет температуру 4–25 °С, артезианская – 8–12 °С, а обратная (в летний период) – приблизительно 30 °С.

Охлаждение водой осуществляют главным образом в поверхностных теплообменниках. Кроме того, воду используют для охлаждения в смесительных теплообменных аппаратах, в которых происходит непосредственное соприкосновение охлаждаемого и охлаждающего теплоносителей.

Достижение более низких температур охлаждения можно обеспечить с помощью низкотемпературных жидких хладагентов. К их числу относятся жидкий аммиак, фреоны, диоксид углерода, холодильные рассола – водные растворы некоторых солей, например хлоридов натрия, магния или кальция, замерзающих при низких температурах. Эти жидкие хладагенты циркулируют в специальных холодильных установках, где теплота от охлаждаемой среды отнимается при их испарении. Холодильные же рассолы выполняют роль промежуточных теплоносителей между испарителем холодильной машины (источник холода) и охлаждаемой средой (потребитель холода).

Воздух в качестве охлаждающего агента широко используют в химической промышленности. По сравнению с водой воздух более доступен, не загрязняет поверхность теплоотдачи отложениями, не корродирует теплообменную аппаратуру, что положительно сказывается на увеличении срока службы воздушных холодильников.

Наиболее широко воздух в качестве охлаждающего агента используют в смесительных теплообменниках – градирнях, являющихся основным элементом оборудования водооборотного цикла.

Водооборотные циклы химических производств. Воду, используемую в процессах охлаждения различных технологических потоков на химических предприятиях, после прохождения через соответствующие теплообменные устройства собирают в сборник-накопитель, а затем подают для охлаждения

на градирни.

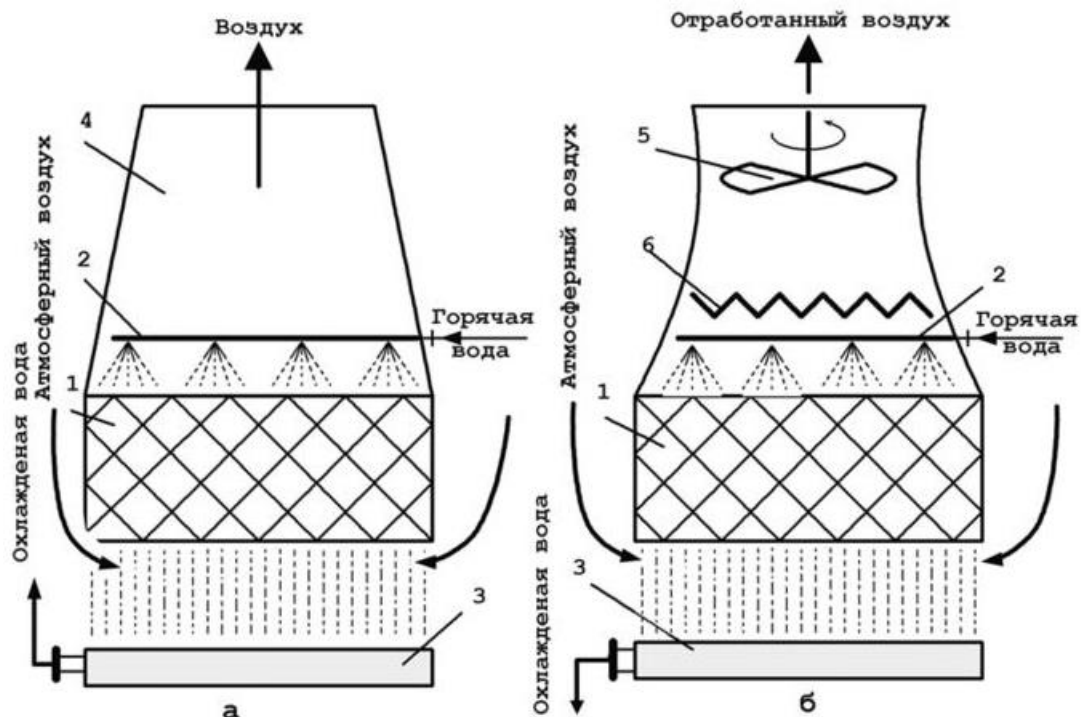


Рисунок 2.3 – Градирни с естественной (а) и принудительной (б) тягой: 1 – поддоны; 2 – слои насадки; 3 – распределители охлаждающей воды; 4 – полая часть градирни для обеспечения естественной тяги; 5 – осевой вентилятор; 6 – брызгоотбойник

Градирня (рис. 2.3) представляет собой полую башню, в которой сверху разбрызгивается теплая вода, а снизу вверх движется воздух (за счет естественной тяги или вентилятора 5). Расположенная внутри градирни насадка 2 служит для увеличения поверхности контакта между водой и воздухом. Горячая вода охлаждается как за счет контакта с холодным воздухом, так и в результате так называемого испарительно охлаждения – в процессе испарения части потока воды.

Отходящая с градирен вода может быть вновь использована для охлаждения технологических потоков, что позволит снизить потребности в свежей воде.

ГЛАВА 3 ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

В процессах нефте- и газопереработки для обеспечения необходимой температуры в аппаратах требуется подводить или отводить тепло. Для этого на технологических установках широко используются специальные аппараты, называемые теплообменными или теплообменниками (нагреватели, испарители, кипятильники, холодильники, конденсаторы и др.).

На изготовление теплообменной аппаратуры затрачивается до 30 % общего расхода металла на все технологическое оборудование. От правильного выбора типа и конструкции теплообменных аппаратов во многом зависят показатели работы всего производства (завода). Высокая эффективность работы теплообменных аппаратов позволяет сократить расход топлива и электроэнергии, затрачиваемой на тот или иной технологический процесс, и оказывает существенное влияние на его технико-экономические показатели.

В аппаратах, предназначенных для нагрева или охлаждения, происходит теплообмен между двумя потоками, при этом один из них нагревается, а другой охлаждается. Поэтому вне зависимости от того, что является целевым назначением аппарата: нагрев или охлаждение, их называют теплообменными аппаратами.

Применительно к нефтегазоперерабатывающей промышленности теплообменные аппараты классифицируются по способу передачи тепла и назначению.

В зависимости от способа передачи теплоты от одного теплоносителя к другому аппараты делятся на следующие группы.

Поверхностные теплообменные аппараты, в которых передача тепла между теплообменивающимися средами осуществляется через поверхность, разделяющую эти среды (кожухотрубчатые, змеевиковые, теплообменники «труба в трубе», аппараты воздушного охлаждения, пластинчатые, спиральные)

Аппараты смешения, в которых передача тепла между теплообменивающимися средами происходит при их непосредственном контакте. Для изготовления таких аппаратов требуется, как правило, меньше металла и во многих случаях они обеспечивают более эффективный теплообмен. Однако их в процессах нефтегазопереработки часто нельзя использовать из-за недопустимости прямого соприкосновения теплообменивающихся потоков.

В зависимости от назначения аппараты делятся на следующие группы.

Теплообменники, в которых один поток нагревается за счет использования тепла другого, получаемого в технологическом процессе и подлежащего в дальнейшем охлаждению. Применение на установке позволяет сократить расходы, подводимого извне тепла и охлаждающего агента. К этой группе аппаратов относятся теплообменники для нагрева нефти на нефтеперерабатывающей установке, осуществляемого за счет использования тепла отходящих с установки дистиллятов; котлы-утилизаторы, где получают водяной пар за счет использования тепла нефтепродуктов, дымовых газов или катализатора на установках каталитического крекинга; регенераторы холода и др.

Нагреватели, испарители, кипятильники, в которых нагрев или частичное испарение осуществляется за счет использования высокотемпературных потоков нефтепродуктов или специальных теплоносителей. В таких аппаратах нагрев или испарение одной среды является целевым процессом, тогда как охлаждение горячего потока является побочным и обуславливается необходимостью нагрева исходного потока. Примером аппаратов этой группы могут служить нагреватели сырья, использующие тепло водяного пара, кипятильники, при помощи которых в низ ректификационной колонны подводится тепло, необходимое для ректификации.

Холодильники и конденсаторы, предназначенные для охлаждения потока или конденсации паров с использованием специального

охлаждающего агента (вода, воздух, испаряющийся аммиак, пропан и др.). Охлаждение и конденсация в этих аппаратах являются целевыми процессами, а нагрев охлаждающего агента побочным. К таким аппаратам холодильники и конденсаторы любой нефтегазоперерабатывающей установки, предназначенные для охлаждения и конденсации получаемых продуктов.

Кристаллизаторы, предназначенные для охлаждения соответствующих жидких потоков до температур, обеспечивающих образование кристаллов некоторых составляющих смеси веществ. В зависимости от температурного режима кристаллизации в этих аппаратах в качестве охлаждающего агента используется вода или специальные хладагенты в виде охлажденных рассолов, испаряющихся аммиака, пропана и др. В нефтегазопереработке кристаллизаторы используются при депарафинизации масел, обезмасливания парафинов, в производстве серы и др.

3.1 Основные виды кожухотрубчатых теплообменников

Поверхностные теплообменные аппараты классифицируются в зависимости от их конструкции. К их числу относятся следующие.

Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с неподвижными трубными решетками (рис. 3.1).

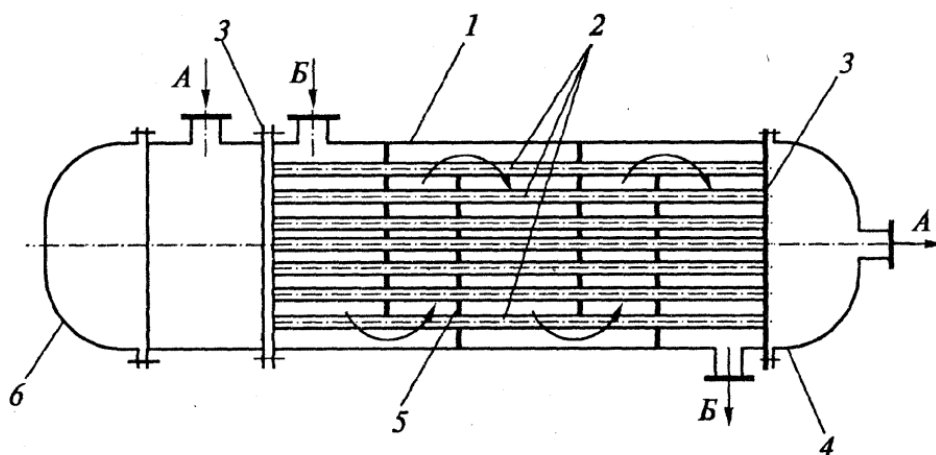


Рисунок 3.1 Одноходовой трубчатый теплообменник

В кожухе 1 размещен трубный пучок, теплообменные трубы 2 которого

развальцованы в трубных решетках 3, жестко соединенных с кожухом. С торцов кожух аппарата закрыт распределительными камерами 4 и 6.

Кожух и камеры соединены фланцами. Для обеспечения направленного движения теплоносителя в межтрубном пространстве устанавливают перегородки 5.

Для подвода и отвода рабочих сред (теплоносителей) аппарат снабжен штуцерами. Теплоноситель А в этих аппаратах движется по трубам, теплоноситель Б – в межтрубном пространстве, ограниченном кожухом и наружной поверхностью труб.

Особенность данных аппаратов – трубы жестко соединены с трубными решетками, а решетки приварены к кожуху, в связи с чем исключена возможность взаимных перемещений труб и кожуха; поэтому их еще называют теплообменниками жесткой конструкции.

Промышленностью выпускаются также многоходовые (по трубному пространству) аппараты с продольными перегородками в распределительной камере – двух-, четырех- и шестиходовые теплообменники жесткой конструкции.

Двухходовый горизонтальный (рис. 3.2) теплообменник состоит из цилиндрического сварного кожуха 8, распределительной камеры 11 и двух крышек 4. Трубный пучок образован трубами 7, которые закреплены в двух трубных решетках 3, приваренных к кожуху. Крышки распределительной камеры и кожух соединены фланцами. В кожухе и распределительной камере выполнены штуцер для ввода и вывода теплоносителей из трубного (штуцер 1, 12) и межтрубного (2, 10) пространств.

Перегородка 13 в распределительной камере образует ходы теплоносителя по трубам. Для герметизации узла соединения продольной перегородки с трубной решеткой использована прокладка 14, уложенная в паз решетки 3.

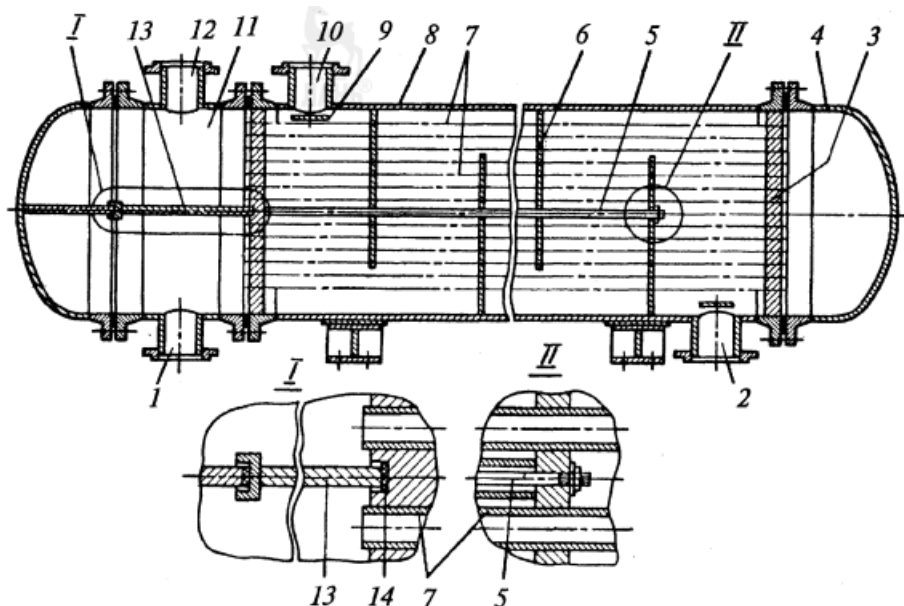


Рисунок 3.2 Двухходовой горизонтальный теплообменник с неподвижной решеткой

Существенное различие между температурами трубок и кожуха в этих аппаратах приводит к большему удлинению трубок по сравнению с кожухом, что обуславливает возникновение напряжения в трубной решетке и может привести к нарушению труб и попаданию одной теплообменивающейся среды в другую. По этой причине теплообменники этого типа используют при небольшой разности температур (менее 50 °С) теплообменивающихся сред, проходящих через трубки и межтрубное пространство.

Очистка межтрубного пространства подобных аппаратов сложна, поэтому теплообменники такого типа применяются в тех случаях, когда среда, проходящая через межтрубное пространство, является чистой, не агрессивной.

Достоинством аппаратов этого типа является простота конструкции и, следовательно, меньшая стоимость.

В зависимости от расположения теплообменных труб различают теплообменные аппараты горизонтального и вертикального типа.

Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с плавающей головкой (с подвижной трубной решеткой) являются наиболее распространенным типом поверхностных аппаратов (рис. 3.3). Подвижная трубная решетка позволяет

трубному пучку свободно перемещаться независимо от корпуса.

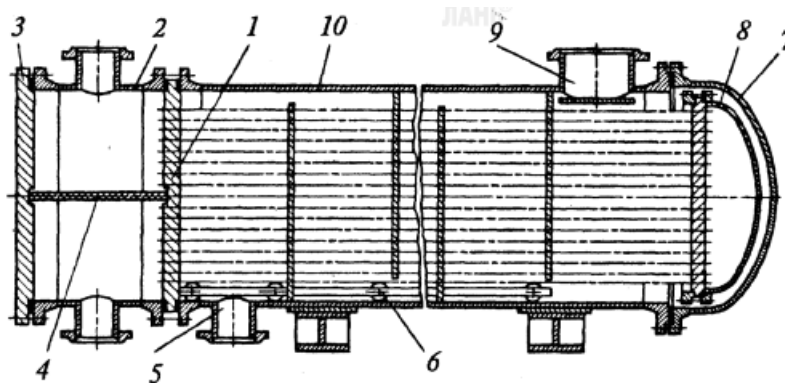


Рисунок 3.3 Кожухотрубчатый теплообменник с плавающей головкой

Горизонтальный двухходовой теплообменник состоит из кожуха 10 и трубного пучка. Левая трубная решетка 1 соединена фланцевым соединением с кожухом и распределительной камерой 2, снабженной перегородкой 4 и закрытой плоской крышкой 3. Правая, подвижная, трубная решетка установлена внутри кожуха свободно и образует вместе с присоединенной к ней крышкой 8 плавающую головку. При нагревании и удлинении трубок плавающая головка перемещается внутри кожуха. С правой стороны к корпусу крепится эллиптическая крышка 7. Для обеспечения свободного перемещения трубного пучка внутри кожуха в аппаратах диаметром 800 мм и более трубный пучок снабжают опорной платформой 6. Верхний штуцер 9 предназначен для ввода пара и поэтому имеет большое проходное сечение; нижний штуцер 5 меньших размеров предназначен для ввода конденсата.

В аппаратах с плавающей головкой трубные пучки сравнительно легко могут быть удалены из корпуса, что облегчает их ремонт, чистку и замену. Однако следует отметить, что конструкция аппаратов с подвижной решеткой относительно сложна, для ее изготовления требуется большой расход металла на единицу поверхности теплообмена и при работе плавающая головка недоступна для ремонта.

Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с температурным компенсатором. В этих аппаратах для частичной компенсации температурных напряжений используют специальные гибкие элементы

(расширители, компенсаторы), расположенные в корпусе.

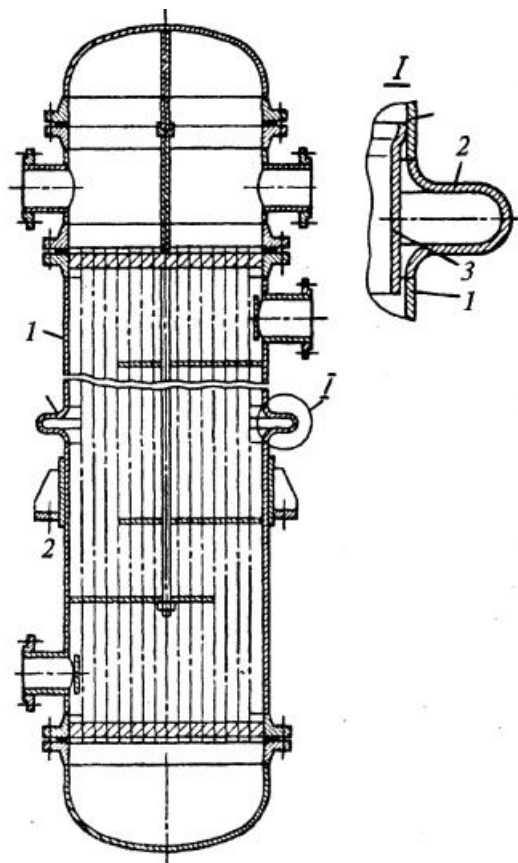


Рисунок 3.4 Вертикальный кожухотрубчатый теплообменник температурным компенсатором на кожухе

Вертикальный кожухотрубчатый теплообменник с температурным компенсатором (рис. 3.4) отличается установкой между двумя частями кожуха 1 линзового компенсатора 2.

Кожухотрубчатые теплообменники с U-образными трубками (рис. 3.5) имеют одну трубную решетку, в которую ввальцованы оба конца U-образных трубок, что обеспечивает свободное удлинение трубок при изменении их температуры.

Такие аппараты состоят из кожуха 2 и трубного пучка, имеющего U-образные трубы 1 и одну трубную решетку 3, которая вместе с распределительной камерой 4 крепится к кожуху аппарата на фланце. Для обеспечения отдельного ввода циркулирующего по трубам теплоносителя в распределительной камере предусмотрена перегородка 5.

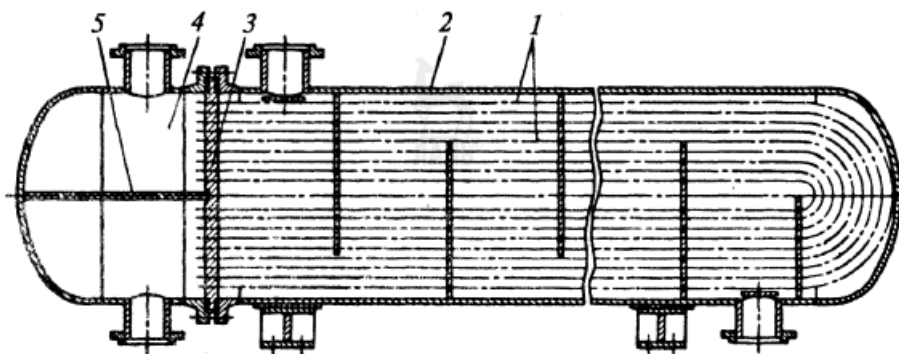


Рисунок 3.5 Теплообменник с U-образными трубками

Поскольку механическая очистка внутренней поверхности труб в аппаратах такого типа практически невозможна, в трубное пространство следует направлять среду, не образующую отложений, которые требуют механической очистки. Внутреннюю поверхность труб в этих аппаратах очищают водой, водяным паром, горячими нефтепродуктами или химическими реагентами.

Испаритель с паровым пространством (рибойлер) (рис. 3.6) состоит из кожуха 1 и одно-трех трубчатых пучков 4. Для обеспечения достаточного объема парового пространства расстояние от верха сливной перегородки 9 до верхней части кожуха 1 принимают не менее $1/3$ диаметра кожуха. Уровень жидкости в испарителе поддерживается сливной перегородкой 9, имеющей зубчатую кромку для равномерного перелива жидкости.

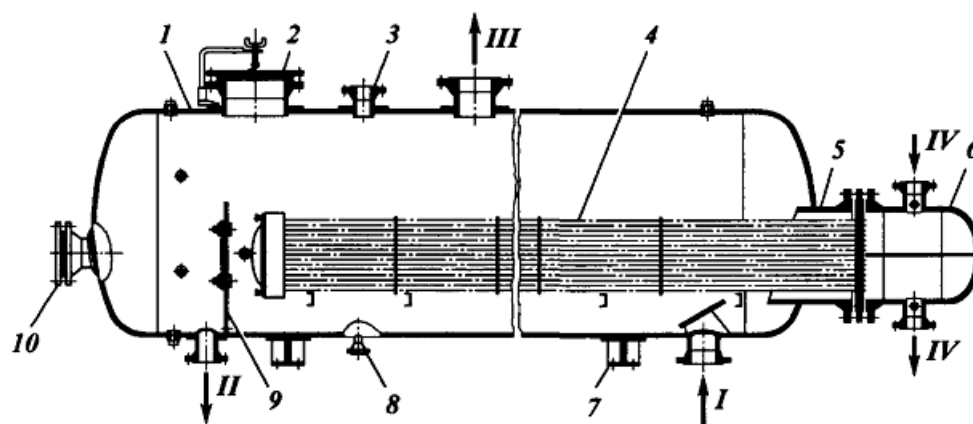


Рисунок 3.6 Испаритель с паровым пространством (рибойлер)

Эффективность кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

повышается с увеличением скорости движения теплообменивающихся потоков и степени их турбулентности.

При неизменной производительности аппарата увеличение скорости движения жидкости в трубках достигается размещением в крышках распределительной камеры перегородок, что изменяет число ходов потока жидкости, проходящей через трубки. В промышленной практике используют аппараты с различным числом ходов, исходя из технологической потребности установки.

Для повышения скорости движения потоков в межтрубном пространстве и обтекаемости поверхности теплообмена, создания большей турбулентности потоков и организации движения теплоносителя в направлении, перпендикулярном к оси труб, в кожухотрубчатых теплообменных аппаратах устанавливают специальные поперечные перегородки. Они выполняют также роль опор трубчатого пучка, фиксируют трубы на заданном расстоянии одна от другой и уменьшают вибрацию труб.

На рис. 3.7 показаны поперечные перегородки разных типов. Наибольшее распространение получили сегментные перегородки (рис. 4.6, а). Высота вырезаемого сегмента равна примерно $1/3$ диаметра аппарата, а расстояние между перегородками – около $0,5$ диаметра аппарата. Поперечные перегородки с секторным вырезом (рис. 3.7, б) оснащены дополнительной продольной перегородкой, равной по высоте половине диаметра аппарата. Секторный вырез, по площади равный четверти сечения аппарата, располагают в соседних перегородках в шахматном порядке. При этом теплоноситель в межтрубном пространстве совершает вращательное движение то по часовой стрелке, то против нее. Аппараты со «сплошными» перегородками (рис. 3.7, д) используют обычно для чистых жидкостей. В этом случае жидкость протекает по кольцевому зазору (около $1,5$ мм) между трубой и перегородкой.

Важно, чтобы зазор между внутренней поверхностью кожуха и перегородкой был минимальным. Это позволяет сократить утечку жидкости,

проходящей через межтрубное пространство и не участвующей в теплообмене. Вместе с тем размер зазора должен быть достаточным для извлечения пучка труб при его ремонте.

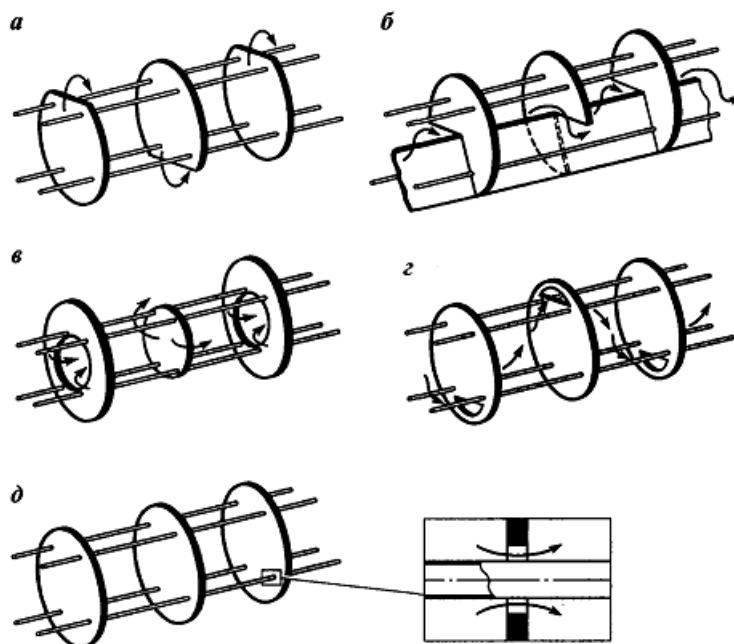


Рисунок 3.7 Поперечные перегородки кожухотрубчатых аппаратов: а – с сегментным вырезом; б – с секторным вырезом; в – кольцевые; г – с щелевым вырезом; д – «сплошные»

Теплообменники типа «труба в трубе» по конструкции делятся на однопоточные (неразборные и разборные) и многопоточные.

Неразборные теплообменники типа «труба в трубе» (рис. 3.8) изготавливают в двух исполнениях: с приварными двойниками на теплообменных трубах, которые эксплуатируются без механической очистки внутренней поверхности труб, и со съемными двойниками на теплообменных трубах, позволяющими осуществлять механическую очистку труб.

В разборных конструкциях теплообменников типа «труба в трубе» внутренние трубы при повышении температуры могут удлиняться независимо от наружных. Конструкция аппаратов позволяет осуществлять регулярную механическую очистку внутренней поверхности теплообменных труб от загрязнений, а также при необходимости вынимать трубы для их замены или механической очистки наружной поверхности.

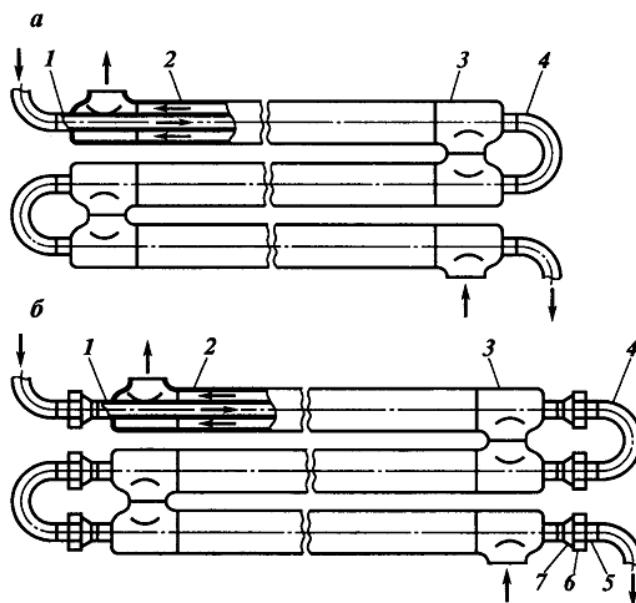


Рисунок 3.8 Неразборный однопоточный теплообменный аппарат типа «труба в трубе»:

- а – с приварными двойниками на теплообменных трубах; б – со съёмными двойниками на теплообменных трубах; 1 – теплообменная труба; 2 – кожуховая труба; 3 – специальный тройник; 4 – двойник; 5 – ниппель; 6 – гайка; 7 – штуцер

Спиральные теплообменники изготавливаются отечественной промышленностью с поверхностью теплообмена $10\text{--}100\text{ м}^2$, они работают как под вакуумом, так и при давлении до 1 МПа при температуре рабочей среды от -20 до $+200\text{ }^\circ\text{C}$. В этих аппаратах может осуществляться теплообмен между рабочими средами жидкость-жидкость, газ-газ и газ-жидкость, а также могут конденсироваться пары и парогазовые смеси.

Благодаря тому, что площадь поперечного сечения каналов по всей длине остается неизменной, загрязнения на стенках в работающем аппарате лучше смываются потоком рабочей среды и теплообменник может продолжительное время работать без чистки.

В спиральных аппаратах поверхность теплообмена образована двумя стальными лентами 1 и 2 толщиной 4–6 мм и шириной 400–1250 мм (рис. 3.9), свернутыми в спираль так, что образуются два канала прямоугольного профиля, по которым в противотоке движутся теплоносители.

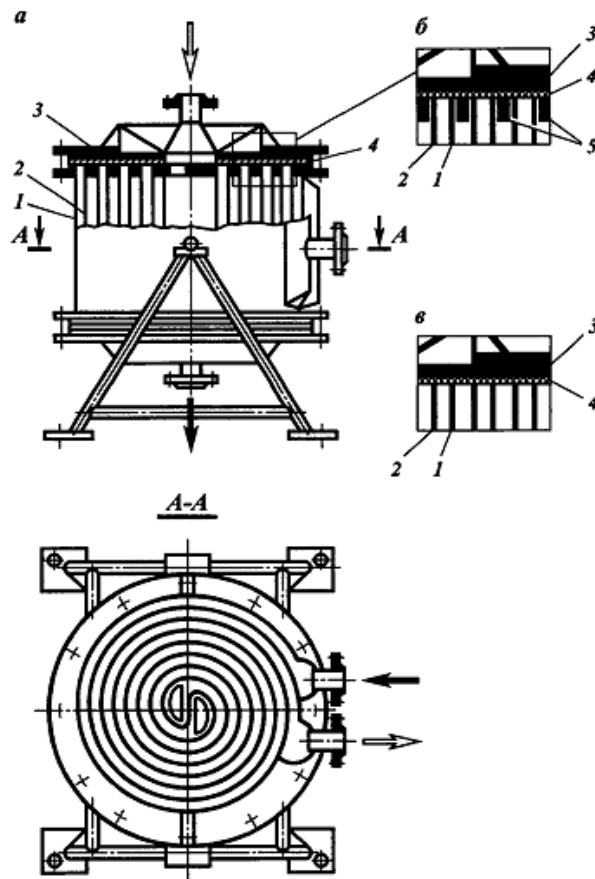


Рисунок 3.9 Конструкция спирального теплообменника:
 а – общий вид; б – уплотнение с торцов лент в аппаратах с тупиковыми каналами; в – уплотнение с торцов лент в аппаратах со сквозными каналами;
 1,2 – ленты, свернутые в спираль; 3 – крышка; 4 – прокладка;
 5 – дистанционные проставки

На поверхности спирали с шагом 70–100 мм приварены штифты (на рисунке не показаны) для придания теплообменнику жесткости и обеспечения требуемого зазора между лентами, который для стандартных аппаратов составляет 8–12 мм. С торцов аппарат закрыт крышками 3 на прокладках 4. В зависимости от способа уплотнения спиральных каналов с торцов различают спиральные теплообменники с тупиковыми и сквозными каналами.

Тупиковые каналы (рис. 3.9, б) образуют приваркой дистанционных проставок 5 к торцу спирали. После снятия крышек 3 и прокладок 4 оба канала открываются с одной стороны, что позволяет производить чистку аппарата. Такой способ уплотнения исключает возможность смешения

теплоносителей при прорыве прокладки и поэтому наиболее распространен.

Сквозные каналы (рис. 3.9, в) с обоих торцов закрыты крышками 3 с прокладками 4, легко поддаются чистке, но не исключают возможность смешения теплоносителей при прорыве прокладки.

Достоинством спиральных теплообменников является компактность, легкость создания высоких скоростей движения теплообмениваемых сред и, как следствие, более высокие тепловые показатели (коэффициент теплопередачи, тепловая напряженность). Гидравлическое сопротивление таких аппаратов относительно невелико и меньше, чем у кожухотрубчатых при одинаковой скорости движения рабочих сред.

К недостаткам аппаратов этой конструкции относятся сложность изготовления и трудность обеспечения плотности соединений.

3.2 Пластинчатые теплообменники

Пластинчатые теплообменники представляют собой аппараты, поверхность которых образована набором тонких штампованных пластин с гофрированной поверхностью. Их различают по степени доступности поверхности теплообмена для осмотра и механической чистки на разборные, разборные со сдвоенными пластинами (полуразборные) и неразборные (сварные или паяные). В пластинчатых теплообменниках можно осуществить теплообмен между рабочими средами жидкость-жидкость, пар-жидкость, пар + газ-жидкость, газ-жидкость, газ-газ. Отечественная промышленность выпускает пластинчатые теплообменники различных модификаций с поверхностью теплообмена от 1 до 800 м² для работы как под вакуумом, так и при давлении до 4 МПа, при температуре рабочей среды от -100 до +300 °С. Пластинчатые теплообменники могут применяться для теплообмена между двумя рабочими средами, каждая из которых проходит внутри аппарата несколькими параллельными потоками, а также для теплообмена между тремя, четырьмя и большим числом сред в одном аппарате.

Наиболее широко применяют разборные пластинчатые теплообменники (рис. 3.10), в которых гофрированные пластины 2 отделены

одна от другой прокладками 3. Пластины сжимаются между неподвижной 1 и нажимной 4 плитами, образуя теплообменную секцию. В каждой пластине имеются четыре отверстия: одно для ввода среды в пространство между пластинами, одно – для вывода среды и два – для сквозного прохода среды.

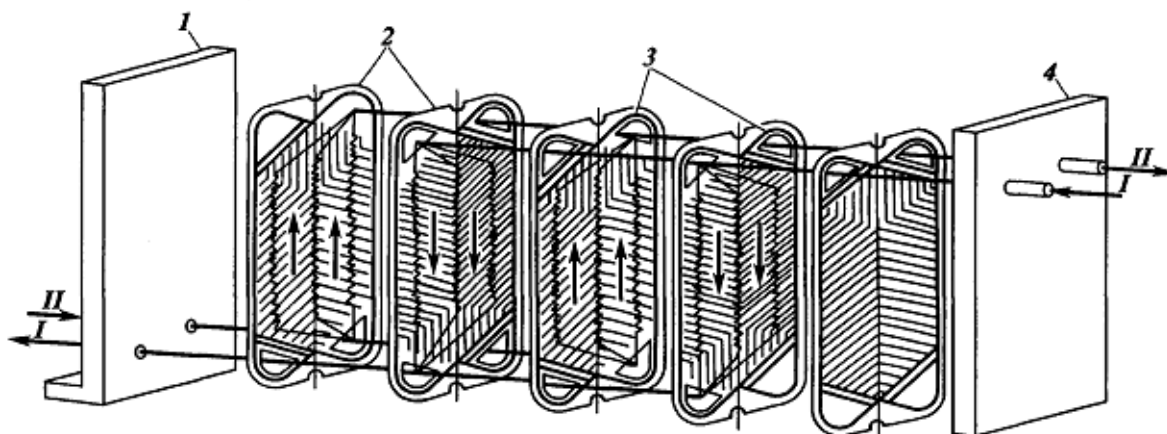


Рисунок 3.10 Схема разборного пластинчатого теплообменника:
1 – неподвижная плита; 2 – гофрированные пластины; 3 – прокладки;
4 – нажимная плита. Поток: I – горячий теплоноситель; II – нагреваемый продукт

Малая толщина пластин и очень высокая турбулентность за счет рифления поверхности обеспечивают более высокие коэффициенты теплопередачи по сравнению с кожухотрубчатыми. Монтаж и демонтаж этих аппаратов осуществляется достаточно быстро, очистка теплообменных поверхностей требует незначительных затрат труда. Серийно выпускаемые разборные теплообменники могут работать с загрязненными рабочими средами при размере твердых включений не более 4 мм. Применение современных материалов для изготовления пластин и прокладок позволяет использовать подобные аппараты в агрессивных средах, например, при охлаждении 98,5 % серной кислоты с температурой 130–140 °С.

Пластины полуразборных теплообменников попарно сварены (или спаяны), и доступ к поверхности теплообмена возможен только со стороны хода одной из рабочих сред. Пластины неразборных теплообменников соединены в теплообменные блоки сваркой или способом пайки в вакуум

ной печи. На рисунке 3.11 показаны современные конструкции разборных и паяных пластинчатых теплообменников.

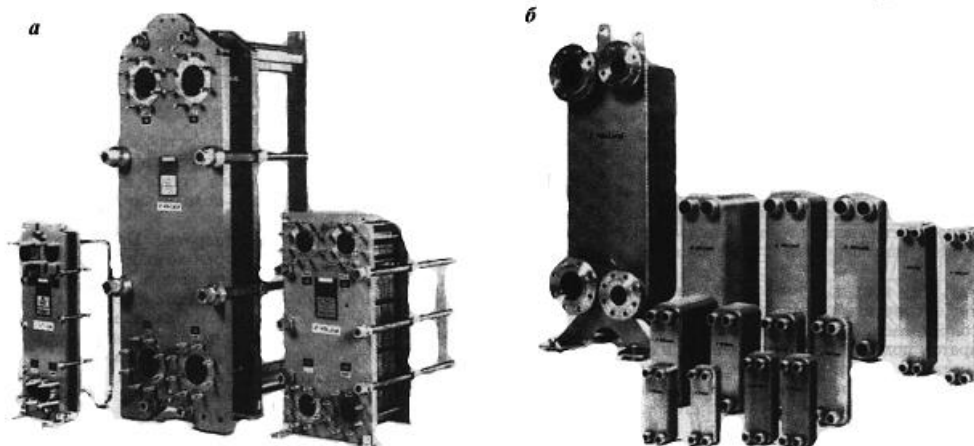


Рисунок 3.11 Конструкции пластинчатых теплообменников фирмы:
а – разборные; б – паяные

3.3 Аппараты воздушного охлаждения

Широкое распространение в промышленности получили аппараты воздушного охлаждения (АВО), в которых в качестве охлаждающего агента используется поток атмосферного воздуха, нагнетаемый специально установленными вентиляторами.

Использование аппаратов этого типа позволяет осуществить значительную экономию охлаждающей воды, уменьшить количество сточных вод, исключает необходимость очистки наружной поверхности теплообменных труб. Эти аппараты используются в качестве конденсаторов и холодильников.

Аппараты воздушного охлаждения различного типа изготавливаются по соответствующим стандартам, в которых предусмотрены большие диапазоны по значению поверхности, степени оребрения и виду конструкционного материала, используемого для их изготовления (сталь различных марок, латунь, алюминиевые сплавы, биметалл).

Аппараты воздушного охлаждения подразделяются на следующие типы:

Горизонтальные

АВГ

Зигзагообразные с одним вентилятором	АВЗ
Зигзагообразные с двумя вентиляторами	АВЗ-Д
Трехконтурные	АВГ-Т
Малопоточные горизонтальные	АВМ-Г
Малопоточные вертикальные	АВМ-В
Для вязких продуктов	АВГ-В
Для высоковязких продуктов	АВГ-ВВП

На рисунке 3.12 приведены конструкции аппаратов воздушного охлаждения с расположением трубных секций зигзагообразно, горизонтально и в виде шатра. Размещение трубных секций зигзагообразное и в виде шатра позволяет иметь большую поверхность теплообмена при той же занятой площади.

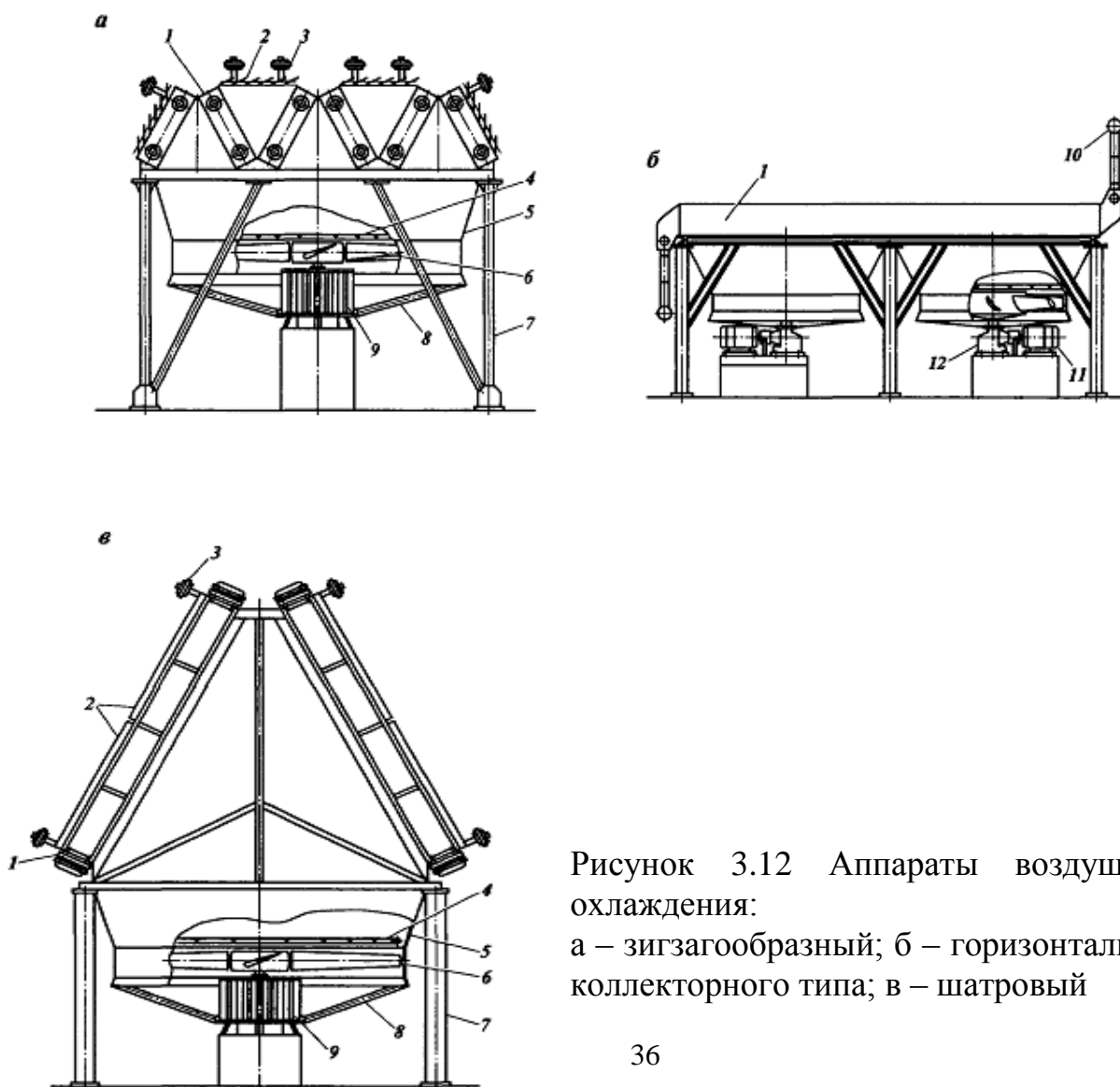


Рисунок 3.12 Аппараты воздушного охлаждения:
а – зигзагообразный; б – горизонтальный коллекторного типа; в – шатровый

В конструкциях аппаратов воздушного охлаждения необходимо предусматривать меры для регулирования режима работы в связи с сезонным и суточным изменением температуры воздуха. Работу аппаратов воздушного охлаждения можно регулировать изменением частоты вращения колеса вентилятора; изменением угла наклона лопастей вентилятора; жалюзийными устройствами, дросселирующими поток воздуха; отключением части или всех вентиляторов (в зимнее время года); рециркуляцией части воздуха и дренированием в атмосферу; увлажнением воздуха (в жаркое летнее время) за счет впрыска химически очищенной воды. Применение жалюзийных устройств, рециркуляция и дренирование воздуха не обеспечивают экономию электроэнергии и менее выгодны, чем другие способы.

Для подачи охлаждающего воздуха применяют осевые вентиляторы пропеллерного типа с диаметром колеса от 0,8 до 7 м. Вентилятор приводится во вращение через редуктор или клиноременную передачу, а при использовании тихоходных электродвигателей колесо вентилятора крепится непосредственно на валу электродвигателя.

Аппараты воздушного охлаждения размещают на металлоконструкциях, железобетонных опорах или непосредственно на верху ректификационной колонны (рис. 3.12). В последнем случае обеспечивается меньшее гидравлическое сопротивление для потока паров, поступающих на конденсацию с верха колонны.



Рисунок 3.12 Парциальные конденсатор воздушного охлаждения

3.4 Теплообменные аппараты смешения

В теплообменных аппаратах смешения тепло передается от одной среды к другой путем непосредственного контакта теплообмениваемых потоков. Такой метод передачи тепла позволяет значительно сократить расход металла на изготовление аппаратов.

Однако применять этот способ можно только в тех случаях, когда допустимо смешение потоков. Например, воду можно нагреть за счет использования тепла водяного пара при их прямом смешении; тепло, выделяемое конденсирующимся паром, непосредственно воспринимается водой. Применение поверхностного аппарата в таких случаях является неоправданным.

Непосредственно смешивать теплообменивающиеся потоки можно и в тех случаях, когда они взаимно не реагируют, не растворяются и в дальнейшем хорошо разделяются; такой случай имеет место в бензиновых конденсаторах смешения.

Часто целесообразным является нагрев гранулированного твердого материала (катализатора, адсорбента, теплоносителя и т.д.) при непосредственном контакте его с нагретыми газами и парами.

Теплообменные аппараты смешения классифицируются по следующим основным признакам. В зависимости от агрегатного состояния смешиваемых потоков теплообмен может осуществляться между средами, находящимися в парообразном (газообразном), жидком или твердом состоянии. Возможны различные случаи – теплообмен между несколькими газами (парами), газом и жидкостью, газом и твердым телом, жидкостью и жидкостью и т.д. В результате теплообмена может измениться состояние теплообменивающихся сред, например, пары частично или полностью сконденсируются, жидкость частично или полностью испарится и т.д.

В зависимости от способа смешения потоков оно может быть одно- или многоступенчатым при прямоточном или противоточном движении смешивающихся сред.

В зависимости от внутреннего устройства, обеспечивающего смешение, аппараты могут быть со специальными распиливающими и распределительными устройствами; каскадные, снабженные специальными полками или перегородками (способствующими смешению); насадочные, в которых контакт происходит в основном на поверхности насадки.

К теплообменным аппаратам смешения относятся барометрические конденсаторы вакуумных колонн, предназначенные для конденсации водяных паров с целью уменьшения нагрузки вакуумсоздающего оборудования (вакуум-насосов, эжекторов). Схему включения и принципиальное устройство барометрического конденсатора рассмотрим на примере полочного конденсатора (рис. 3.13).

В барометрический конденсатор поступает смесь газов и паров, состоящая из воздуха, продуктов разложения нефтяного сырья, водяных паров (которые были поданы в ректификационную колонну для технологических целей) и относительно небольшого количества нефтяных паров. Для конденсации и охлаждения этой смеси подается холодная вода, стекающая по перфорированным полкам при большом числе струй. Воздух в

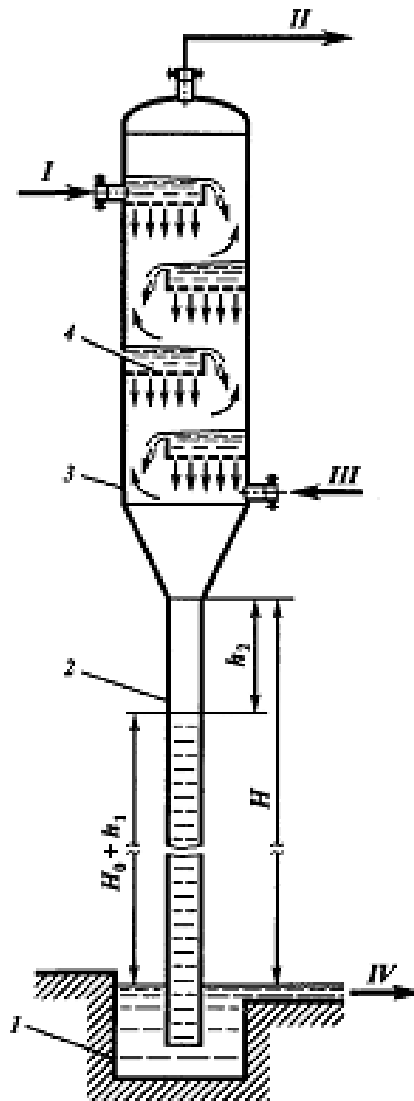


Рисунок 3.13 Схема барометрического конденсатора:

1 – колодец; 2 – барометрическая труба; 3 – корпус конденсатора;
 4 – распределительные полки. Поток: I – холодная вода; II – пары и газы к вакуумсоздающему оборудованию; III – смесь паров и газов; IV – нагретая вода

барометрический конденсатор попадает через неплотности аппаратуры и трубопроводов, находящихся под вакуумом, частично вместе с водяным паром, а также вследствие частичной деаэрации воды, поступающей в конденсатор. Полки занимают около $2/3$ сечения конденсатора и размещаются таким образом, что струи с вышележащих полок попадают на нижележащие. Часть воды проходит через отверстия в полках, часть перетекает через боковые поперечные планки полок, образуя на них определенный уровень воды. Охлаждаемая газопаровая смесь, поднимаясь

снизу вверх, встречает на своем пути большое число струй, а также водяную завесу. Таким образом, в барометрическом конденсаторе создается большая поверхность контакта охлаждаемой смеси с водой. В результате газопаровая смесь охлаждается, а содержащиеся в ней водяные и нефтяные пары в большей своей части конденсируются. Конденсат вместе с охлаждающей водой стекает по барометрической трубе в приемный колодец.

При переработке сернистого сырья в отходящей воде содержится значительное количество сероводорода. Сверху из барометрического конденсатора отсасываются газы вместе с частью водяных паров, количество которых предопределяется давлением насыщенных паров воды при температуре верха конденсатора. Чем ниже температура воды, поступающей в конденсатор, тем ниже температура газов, уходящих с верха конденсатора, и тем меньше количество водяных паров, уходящих вместе с газами.

Применяют барометрические конденсаторы различных конструкций, различающиеся по устройствам приспособлений для распределения воды. Чаще всего используются аппараты полочного типа; обычно устанавливают 4–7 полок с диаметром отверстий 1–7 мм.

Применение барометрических конденсаторов на нефтеперерабатывающих заводах ведет к значительному загрязнению сточных вод (сероводород, нефтепродукты), что требует проведения специальных дорогостоящих мероприятий по очистке. В этой связи на ряде заводов для конденсации паров, отходящих из верха вакуумной колонны, вместо барометрического конденсатора используют поверхностные аппараты.

В практике работы нефтеперерабатывающих установок эффективно применяется теплообмен «горячей струей» (рис. 3.14). Например, на установках для перегонки нефти, отбензиненная нефть из низа колонны направляется в атмосферную колонну через трубчатую печь. Вместе с основным потоком отбензиненной нефти через печь проходит поток нефти, циркулирующий между колонной и печью и направляемый в низ колонны в

качестве «горячей струи». Циркулирующий поток в печи воспринимает тепло, нагреваясь от температуры t_1 , до температуры t_2 , и затем отдает это тепло в нижней части колонны, охлаждаясь от t_2 до t_1 .

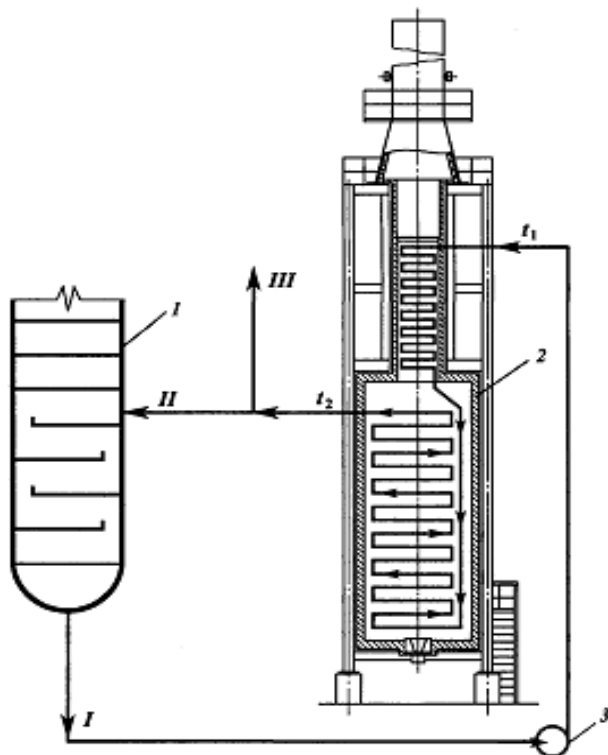


Рисунок 3.14 Схема нагрева «горячей струей»:
1 – отбензинивающая колонна (предварительный эвапоратор); 2 – трубчатая печь; 3 – насос. Поток: I – отбензиненная нефть; II – горячая струя; III – отбензиненная нефть в атмосферную колонну

ГЛАВА 4 ТРУБЧАТЫЕ ПЕЧИ

Трубчатая печь является аппаратом, предназначенным для передачи нагреваемому продукту тепла, выделяющегося при сжигании топлива в топочной камере печи.

Трубчатые печи широко распространены в нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической, коксохимической и других отраслях промышленности, являются составной частью многих установок и применяются в различных технологических процессах (перегонка нефти, мазута, пиролиз, каталитический крекинг, риформинг, гидроочистка, очистка масел и др).

Существуют различные конструкции трубчатых печей, отличающихся способом передачи тепла, количеством и формой топочных камер, числом секций (камер) в зоне радиации, относительным расположением осей факела и труб, способом сжигания топлива, типом облучения труб, числом потоков нагреваемого продукта, расположением конвекционной камеры относительно радиантной, длиной радиантных и конвекционных труб.

Основными характеристиками трубчатых печей являются производительность печи, полезная тепловая нагрузка, теплонапряженность поверхности нагрева и коэффициент полезного действия печи.

В промышленности применяют трубчатые печи с поверхностью нагрева радиантных труб 15–2000 м². Теплопроизводительность трубчатых печей различных конструкций изменяется от 0,12 до 240 МВт, а производительность по нагреваемой среде достигает 8–105 кг/ч. Температура нагреваемой среды на входе и выходе из печи в зависимости от технологического процесса изменяется в диапазоне от 70 до 900 °С, а давление – от 0,1 до 30 МПа. Для трубчатых печей КПД колеблется в пределах от 0,65 до 0,85.

4.1 Теплообмен в трубчатой печи

Трубчатая печь имеет камеры радиации и конвекции. В камере радиации (топочной камере), где сжигается топливо, размещена радиантная

поверхность (экран), поглощающая лучистое тепло в основном за счет радиации.

В камере конвекции расположены конвекционные трубы, воспринимающие тепло главным образом при соприкосновении дымовых газов с поверхностью нагрева путем конвекции.

Нагреваемый продукт в печи последовательно проходит через конвекционные и радиантные трубы, поглощая тепло. Обычно радиантная поверхность воспринимает большую часть тепла, выделяемого в печи при сгорании топлива.

Лучистое тепло эффективно передается при охлаждении дымовых газов до 1000–1200 К. Снижение температуры дымовых газов до более низких значений часто бывает неоправданным, так как при этом радиантная поверхность работает с пониженной теплонапряженностью поверхности нагрева и требуется значительно увеличить поверхность радиантных труб.

Эффективность теплопередачи конвекцией в меньшей степени зависит от температуры дымовых газов. Конвекционная поверхность использует тепло дымовых газов и может обеспечить их охлаждение до температуры, при которой значение коэффициента полезного действия аппарата будет экономически оправданным.

Если наличие конвекционной поверхности для нагрева сырья не является обязательным или размеры этой поверхности могут быть существенно уменьшены, то тепло дымовых газов может быть использовано для иных целей, например для подогрева воздуха или производства водяного пара. При небольшой производительности иногда применяют печи без конвекционной поверхности, более простые в конструктивном отношении, но обладающие невысоким коэффициентом полезного действия.

Рассмотрим механизм процесса передачи тепла в печи, состоящей из двух камер с настильным пламенем. Характерной особенностью этой печи является наклонное расположение в низу печи форсунок (горелок),

обеспечивающих соприкосновение факела с поверхностью стены, размещенной в середине камеры радиации (рис. 4.1).

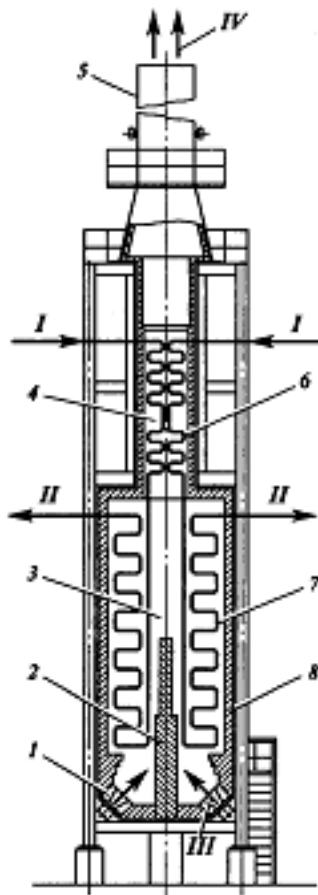


Рисунок 4.1 Схема работы трубчатой печи с объемно-настильным сжиганием топлива:

I – форсунка; 2 – настильная стенка; 3 – камера радиации (топочная камера); 4 – камера конвекции; 5 – дымовая труба; 6 – змеевик конвекционных труб; 7 – змеевик радиантных труб; 8 – футеровка. Потoki: I – вход сырья; II – выход сырья; III – топливо и воздух; IV – дымовые газы

В топочную камеру этой печи при помощи форсунки вводится распыленное топливо, а также необходимый для горения нагретый или холодный воздух. Высокая степень дисперсности топлива обеспечивает его интенсивное перемешивание с воздухом и более эффективное горение.

Соприкосновение факела с поверхностью настильной стены обуславливает повышение ее температуры; излучение происходит не только от факела, но и от раскаленной стены. Тепло, выделенное при сгорании

топлива, расходуется на повышение температуры дымовых газов и частиц горящего топлива; последние раскаляются и образуют светящийся факел.

Температура, размер и конфигурация факела зависят от многих факторов и, в частности, от температуры и количества воздуха, подаваемого для горения топлива, способа подвода воздуха, конструкции и нагрузки форсунки, теплотворной способности топлива, расхода форсуночного пара, размера радиантной поверхности (степени экранирования топки) и др.

При повышении температуры воздуха увеличивается температура факела, повышается скорость горения и сокращаются размеры факела. Размеры факела уменьшаются и при увеличении (до известного предела) количества воздуха, поступающего в топку, так как избыток воздуха ускоряет процесс горения топлива.

При недостаточном количестве воздуха факел получается растянутым, топливо полностью не сгорает, что приводит к потере тепла. Чрезмерное количество воздуха недопустимо вследствие повышенных потерь тепла с отходящими дымовыми газами и более интенсивного окисления (окалинообразования) поверхности нагрева.

Воздух, необходимый для горения топлива, подводят к устью форсунки, т.е. к началу факела. В некоторых форсунках топливо распыляется воздухом, который в этом случае вводится в топку совместно с топливом. В ряде конструкций во внутренней полости стен печей размещается канал для подачи так называемого вторичного воздуха, позволяющий подводить необходимый для горения воздух по длине факела, что повышает температуру излучающей стенки и способствует более равномерной передаче тепла радиацией.

В такой печи тепло излучением передается от факела, излучающей стенки и трехатомных газов (двуокись углерода, водяной пар, диоксид серы), обладающих избирательной способностью поглощать и излучать лучи определенной длины волны.

Часть лучей через пространство между трубами попадает на поверхность кладки, вдоль которой расположены эти трубы; эти лучи разогревают кладку, и она, в свою очередь, излучает; при этом часть энергии поглощается той частью поверхности труб, которая обращена к стенке кладки.

Настильная стена, а также прочие стены кладки, у которых расположены трубы (экранированная часть кладки) или свободные от труб (незаэкранированные), принято называть вторичными излучателями.

Радиантные трубы получают тепло не только излучением, но также и от соприкосновения дымовых газов с поверхностью труб, имеющих более низкую температуру (теплопередача свободной конвекцией). Из всего количества тепла, воспринятого радиантными трубами, значительная часть (85–90 %) передается излучением, остальное конвекцией.

Наружная поверхность труб в свою очередь излучает некоторое количество тепла, т.е. имеет место процесс взаимоизлучения, однако температура поверхности труб вследствие непрерывного отвода тепла сырьем, проходящим через радиантные трубы, значительно ниже температуры других источников излучения и поэтому в итоге взаимоизлучения через поверхность радиантных труб сырью передается небольшое количество тепла.

В результате теплопередачи, осуществляемой в топочной камере, дымовые газы охлаждаются и поступают в камеру конвекции, где происходит их прямое соприкосновение с более холодной поверхностью конвекционных труб (вынужденная конвекция).

В камере конвекции передача тепла осуществляется также за счет радиации трехатомных дымовых газов и от излучения стенок кладки. Наибольшее количество тепла в камере конвекции передается путем конвекции; оно достигает 60–70 % общего количества тепла, воспринимаемого этими трубами. Передача тепла излучением от газов

составляет 20–30 %; излучением стенок кладки конвекционной камеры передается в среднем около 10 % тепла.

Основным фактором, определяющим эффективность передачи тепла конвекцией, является скорость движения дымовых газов, поэтому при конструировании трубчатых печей стремятся обеспечить ее наибольшее значение. Это достигается размещением минимального числа труб в одном горизонтальном ряду и выбором минимального расстояния между осями труб. Однако при повышении скорости дымовых газов в камере конвекции увеличивается сопротивление потоку газов, что и ограничивает выбор величины скорости. С другой стороны, сокращение числа труб в одном горизонтальном ряду приводит к увеличению высоты камеры конвекции. Это обстоятельство также определяет выбор допустимой скорости движения дымовых газов в камере конвекции.

4.2 Основные показатели работы трубчатых печей

Основными показателями, характеризующими работу трубчатой печи, являются полезная тепловая нагрузка, теплонапряженность поверхности нагрева и топочного пространства, коэффициент полезного действия печи.

Важнейшей характеристикой печи является полезная тепловая нагрузка, т.е. количество тепла, воспринимаемого сырьем в печи. Тепловую нагрузку печи измеряют в кВт или кДж/ч. На ряде действующих нефтеперерабатывающих заводов эксплуатируются трубчатые печи с полезной тепловой нагрузкой от 10 до 20 МВт. На высокопроизводительных установках тепловая мощность печей составляет 50–80 МВт.

Важным показателем, характеризующим работу трубчатой печи, является теплонапряженность поверхности нагрева, или плотность теплового потока, т. е. количество тепла, переданного через 1 м² поверхности нагрева в единицу времени.

Различают среднюю теплонапряженность труб всей печи, среднюю теплонапряженность радиантных и конвекционных труб, а также теплонапряженность отдельных участков труб (локальная

теплонапряженность). Значение тепловой напряженности поверхности нагрева характеризует, насколько эффективно передается тепло через поверхность нагрева всей печи или отдельных ее частей. Чем выше средняя теплонапряженность поверхности нагрева всей печи, тем меньше размеры печи, обеспечивающей передачу заданного количества тепла и, следовательно, тем меньше затраты на ее сооружение.

Тепловая напряженность топочного пространства характеризует количество тепла, выделяемого при сгорании топлива в единицу времени в единице объема топки. Эта величина в известной мере характеризует эффективность использования объема топки. Размеры топки трубчатых печей во многих случаях зависят не от значения допустимого удельного тепловыделения, а от конструктивных особенностей печи и допустимого значения теплонапряженности поверхности нагрева радиантных труб. В трубчатых печах теплонапряженность топочного пространства обычно составляет 40–80 кВт/м³, тогда как в паровых котлах, где объем топочного пространства в основном предопределяется условием полного сгорания топлива, это значение намного больше.

Коэффициент полезного действия трубчатой печи есть величина, характеризующая полезно используемую часть тепла, выделенного при сгорании топлива. При полном сгорании топлива эта величина зависит главным образом от коэффициента избытка воздуха, температуры дымовых газов, выходящих из печи, а также от степени тепловой изоляции трубчатой печи. Снижение коэффициента избытка воздуха так же, как и понижение температуры отходящих дымовых газов, способствует повышению коэффициента полезного действия печи. При подсосе воздуха через неплотности кладки коэффициент избытка воздуха повышается, что приводит к снижению коэффициента полезного действия печи. Для трубчатых печей значение коэффициента полезного действия находится в пределах от 0,65 до 0,85.

4.3 Основные типы печей

В промышленности применяется большое число различных конструкций и типоразмеров трубчатых печей. При выборе печи в основном следует учитывать вид топлива (газовое или комбинированное); требование технологического процесса к расположению труб камеры радиации (горизонтальное или вертикальное); необходимость дифференциального подвода тепла к трубам камеры радиации; количество регулируемых потоков; время пребывания продукта в печи или камере радиации.

На действующих установках нефтегазопереработки широко распространены шатровые печи и печи беспламенного горения, которые в настоящее время отнесены к печам устаревшей конструкции.

Шатровые печи (рис. 4.2), имеющие две камеры радиации с наклонным сводом и одну камеру конвекции, расположенную в центре печи, применяются на установках АВТ производительностью 1,5–3,0 млн. т/год. Нагреваемое сырье поступает в конвекционную камеру и двумя потоками проходит через трубы. В печи имеются муфели, в которых размещаются форсунки. Горение топлива практически завершается в муфельном канале, и в топку поступают раскаленные продукты сгорания.

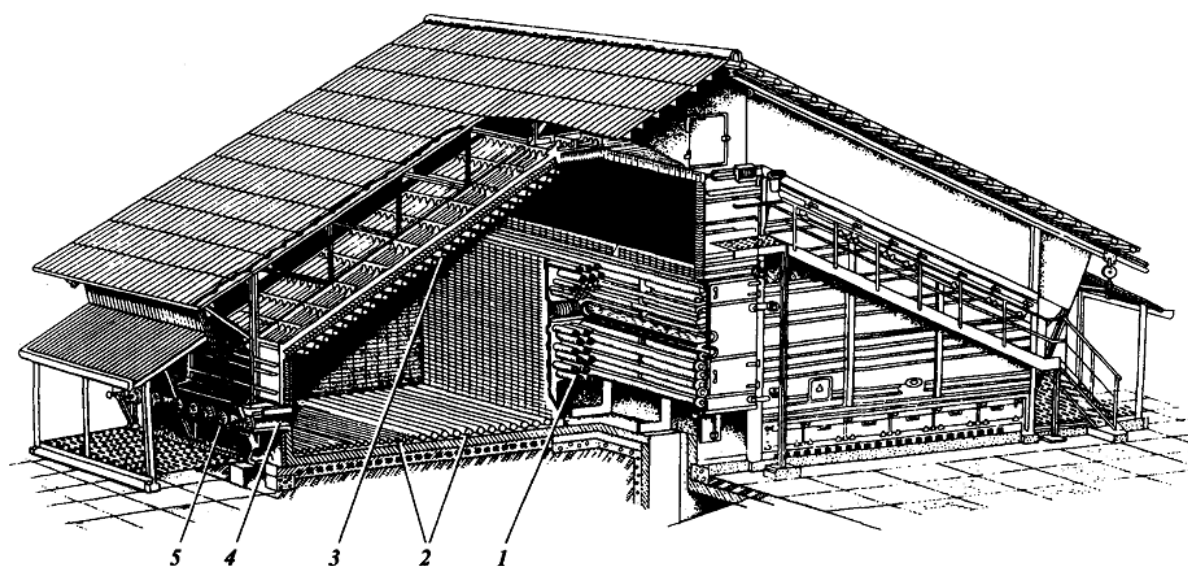


Рисунок 4.2 Схема двухкамерной печи с наклонным сводом:

- 1 – конвекционная камера; 2 – подовый экран радиантной камеры;
- 3 – потолочный экран радиантной камеры; 4 – муфели; 5 – форсунки

Двухскатные печи шатрового типа имеют серьезные недостатки: они громоздки, металлоемки, КПД их не превышает 0,74, теплонапряженность камер низкая, дымовые газы покидают конвекционную камеру при сравнительно высокой температуре (450–500 °С).

В 60-е годы на АВТ и других технологических установках начали широко применяться печи беспламенного горения с излучающими стенками (рис. 4.3). беспламенные панельные горелки 1 расположены пятью рядами в каждой фронтальной стене камеры радиации.

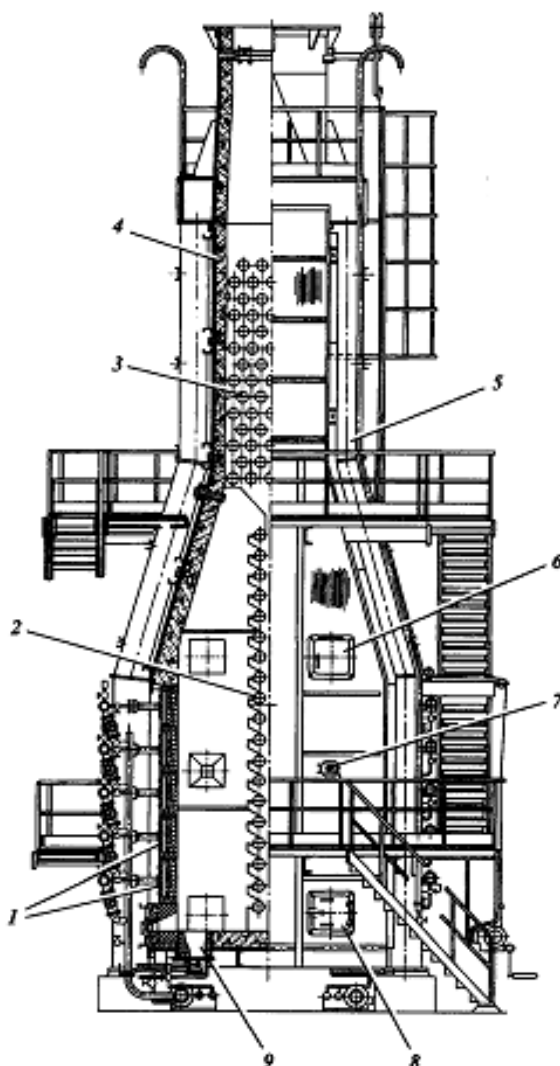


Рисунок 4.3 Трубчатая печь беспламенного горения с излучающими стенками:

- 1 – беспламенные панельные горелки; 2 – змеевик радиантных труб; 3 – змеевик конвекционных труб; 4 – футеровка; 5 – каркас; 6 – выхлопное окно; 7 – смотровое окно; 8 – люк-лаз; 9 – резервные горелки

Каждый горизонтальный ряд имеет индивидуальный газовый коллектор, что создает возможность независимого регулирования теплопроизводительности горелок одного ряда и теплопередачи к соответствующему участку радиантного экрана 2.

Существует пять типов печей с излучающими стенками, тепловая мощность которых изменяется от 8,9 до 26,7 МВт. Конструктивно печи отличаются между собой в основном длиной труб, которая в зависимости от тепловой мощности изменяется от 6 до 18 м. Дымовые трубы печей расположены в верхней части, дымовые газы направляются снизу вверх. Печи работают на газообразном топливе, причем газы должны иметь постоянный углеводородный состав, что является серьезным недостатком печей.

В печи предусмотрена возможность работы на резервном жидком и газовом (газ, содержащий конденсат) топливе. Для этого в поду камеры радиации вдоль излучающих стен установлены резервные газомазутные горелки 9. Факелы этих горелок настилаются на поверхность панельных горелок и образуют сплошное зеркало излучения. При этом первичный воздух подается к горелкам в поду через регистры с шиберами, а вторичный – по высоте настила факела через смесители отключенных панельных горелок. Печи беспламенного горения компактны, малогабаритны.

В совершенствовании и конструировании трубчатых печей нового типа, повышении их эффективности, типизацию и стандартизацию печного оборудования большой вклад сделан ВНИИнефтемашем, который создал и осуществил внедрение в промышленность трубчатых печей ряда типов, по которым издан каталог, позволяющий выбрать конструкцию и размеры типовой трубчатой печи для соответствующего технологического процесса.

При составлении каталога были приняты следующие условные обозначения: первая буква – конструктивное исполнение (Г – трубчатые печи с верхним отводом дымовых газов и горизонтальными радиантными трубами; В – трубчатые печи с верхним отводом дымовых газов и

вертикальными радиантными трубами; Ц – цилиндрические трубчатые печи с верхней камерой конвекции; К – цилиндрические трубчатые печи с кольцевой камерой конвекции; С – секционные трубчатые печи); вторая буква – способ сжигания топлива (С – свободный факел; Н – настильный факел; Д – настильный факел с дифференциальным подводом воздуха по высоте факела). Цифра, стоящая после буквенного обозначения, означает число радиантных камер или секций, при отсутствии цифры печь однокамерная или односекционная.

Печи типа ГС – коробчатые с верхним отводом дымовых газов, горизонтальным расположением труб в радиантной и конвекционной камерах и свободного вертикального сжигания комбинированного топлива. Горелки расположены в один ряд в поду печи. Обслуживание горелок производится с одной стороны печи, что позволяет устанавливать рядом две камеры радиации (ГС2).

Печи типа ГС применяются на установках атмосферной и вакуумной перегонки нефти, вторичных процессов.

Печи типа ГС2 предпочтительны на установках замедленного коксования, крекинг-процессов, где требуется нагрев нефтепродуктов с низкими значениями теплонапряженности поверхности нагрева.

Печи типа ГН – коробчатые с верхним отводом дымовых газов, горизонтальным настенным или центральным трубным экраном и объемно-настильного сжигания комбинированного топлива (вариант I) или настильного сжигания газового топлива на фронтальные стены (вариант II).

При исполнении печи по варианту I горелки расположены в два ряда на фронтальных стенах под углом 45°. По оси печи расположена настильная стена, на которую направлены горящие факелы. Печь ГН2 имеет две камеры радиации и применяется для процессов, требующих «мягкий» режим нагрева (установки замедленного коксования, крекинг-процессы).

По варианту II горелки расположены ярусами на фронтальных стенах, а двухрядный горизонтальный экран – по оси печи. Тепло к экранам

передается от фронтальных стен, на которые настилаются факелы веерных горелок. Данный тип печи предназначен для реконструкции существующих печей беспламенного горения, а также в процессах средней производительности, обеспеченных газовым топливом, в том числе с большим процентом водорода.

Печи типа ВС – узкокамерные секционные с верхним отводом дымовых газов и вертикальными трубами змеевика (рис. 4.4).

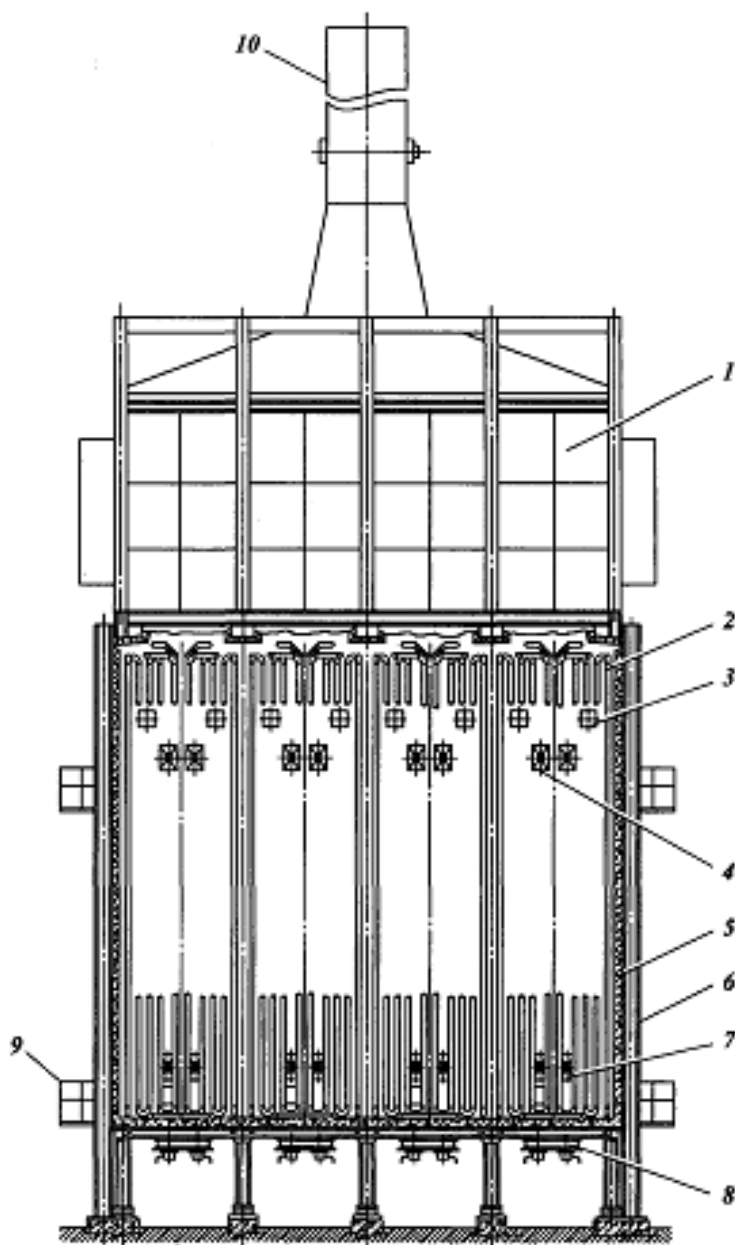


Рисунок 4.4 Конструкция трубчатой печи типа ВС:

- 1 – камера конвекции; 2 – змеевик радиантных труб; 3 – взрывное окно; 4, 7 – гляделка; 5 – футеровка; 6 – каркас; 8 – горелка; 9 – лестничная площадка; 10 – дымовая

Производительность каждой секции 10–17 МВт. Вертикальные трубы радиантного змеевика расположены у всех четырех стен камеры. Газомазутные горелки расположены в поду камеры, обслуживание горелок с двух сторон. Предусмотрены четыре типоразмера этих печей, каждый типоразмер отличается количеством одинаковых камер радиации.

Над камерой радиации расположена камера конвекции прямоугольного сечения с горизонтальными гладкими трубами. У многосекционных трубчатых печей камеры радиации отдельных секций объединены в общем корпусе. Смежные секции отделены одна от другой двумя рядами труб радиантного змеевика двустороннего облучения. В крайних секциях у стен радиантные трубы размещены в один ряд.

Печи типа СС – секционные с горизонтально расположенным змеевиком, отдельно стоящей конвекционной камерой, встроенным воздухоподогревателем и свободного вертикально-факельного сжигания топлива. Трубный змеевик каждой секции состоит из двух или трех транспортабельных пакетов заводского изготовления. Змеевик каждой секции самонесущий и устанавливается непосредственно на поду печи.

Печи типа ЦС – цилиндрические с пристенным расположением труб змеевика в одной камере радиации и свободного вертикально-факельного сжигания комбинированного топлива. Печи выполняются в двух вариантах: без камеры конвекции и с камерой конвекции.

Печи типа КС – цилиндрические с кольцевой камерой конвекции, встроенным воздухоподогревателем, вертикальными трубными змеевиками в камерах радиации и конвекции и свободного вертикально-факельного сжигания топлива (рис. 4.5). Комбинированные горелки расположены в поду печи. На стенах камеры радиации установлен одно- или двухрядный настенный трубный экран. Конвективный змеевик так же, как и воздухоподогреватель, набирают секциями и располагают в кольцевой камере конвекции, установленной соосно с цилиндрической радиантной камерой.

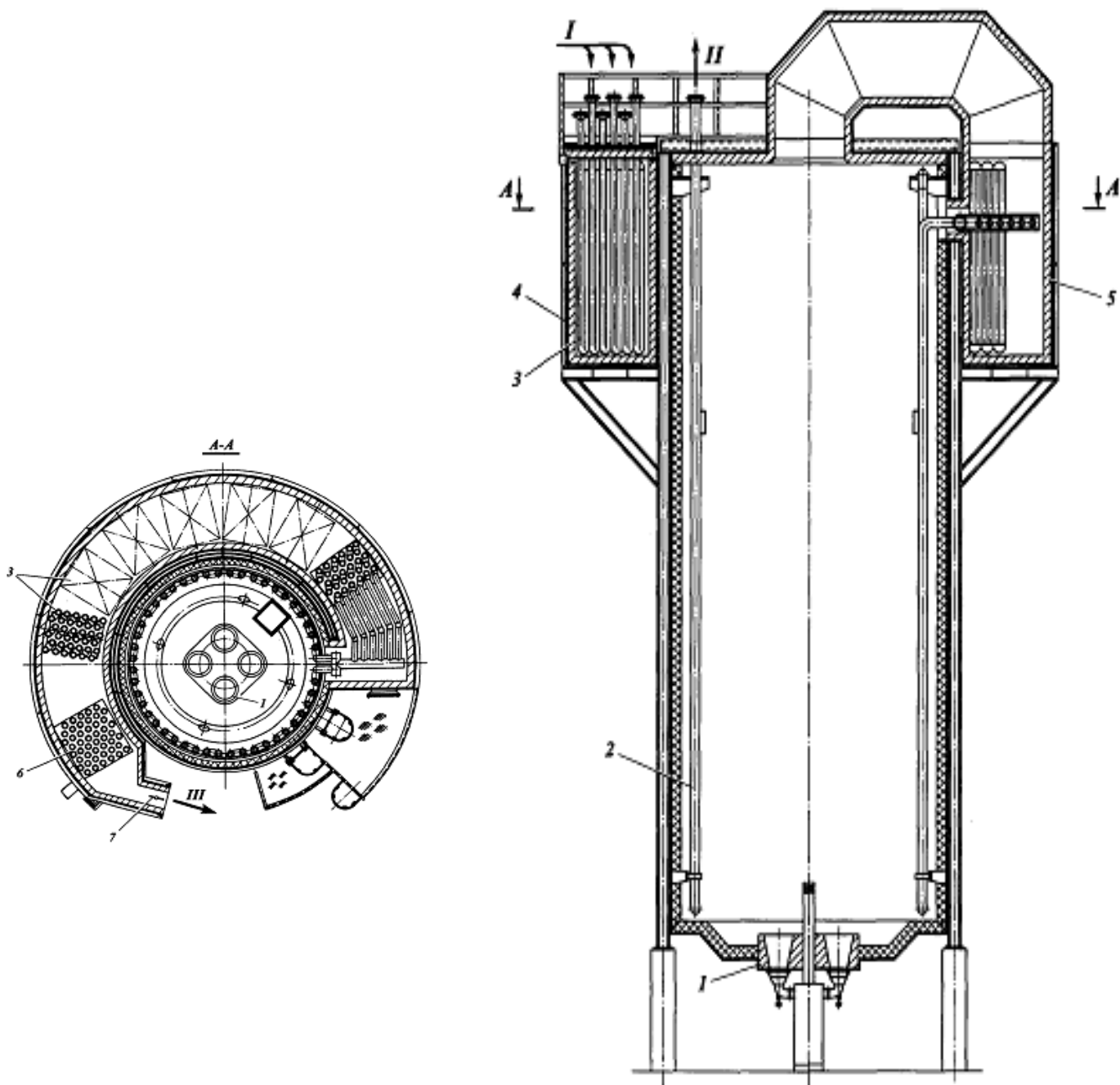


Рисунок 4.5 Конструкция печи типа КС:

1 – горелка; 2 – змеевик радиантных труб; 3 – змеевик конвекционных труб; 4 – каркас; 5 – футеровка; 6 – воздухоподогреватель; 7 – шибер. Поток: I – продукт на входе; II – продукт на выходе; III – дымовые газы

Печи типа КД4 – цилиндрические четырехсекционные с кольцевой камерой конвекции, встроенным воздухоподогревателем, дифференциальным подводом воздуха по высоте факела, вертикальным

расположением змеевика радиантных и конвекционных труб, настильным сжиганием комбинированного топлива.

Печи выполняются в двух конструктивных исполнениях: с дымовой трубой, установленной на печи или стоящей отдельно.

Дутьевые комбинированные горелки расположены в поду печи. Оси горелок наклонены в сторону рассекателя-распределителя, установленного в центре печи.

Рассекатель изготовлен в виде пирамиды с вогнутыми гранями, представляющими собой настильные стены для факелов горелок каждой камеры радиации. Рассекатель выполняет следующие функции: делит объем радиантной камеры на четыре автономные зоны теплообмена, что позволяет осуществлять дифференцированный подвод тепла по длине радиантного змеевика; является поверхностью настила факелов горелок, которые имеют стабильную толщину, что позволяет приблизить трубные экраны к горелкам и сократить объем камеры.

В печи осуществляется двухстадийное сжигание топлива. Первичный воздух (около 70 % объема) подается принудительно к горелкам, а остальное количество – по высоте настила, для чего в кладке граней расположены каналы прямоугольного сечения, а в каркасе рассекателя – отдельные воздухопроводы, количество которых вдвое превышает количество граней. Каждый воздухопровод оснащен поворотным шибером. Двухстадийное сжигание топлива дает возможность растянуть факелы по высоте граней и повысить равномерность излучения по высоте радиантных труб.

Конвективный змеевик, как и воздухоподогреватель, набирают секциями и размещают в кольцевой камере конвекции, расположенной соосно с цилиндрической радиантной камерой.

ГЛАВА 5 ВЫПАРИВАНИЕ

5.1 Сущность процесса выпаривания

Выпариванием называют процесс частичного удаления растворителя из растворов путем кипения последних.

Раствор какой-либо соли, подлежащий выпариванию, называют исходным или свежим раствором. Получаемый в процессе выпаривания раствор называют упаренным раствором, а отводимый пар растворителя – вторичным паром. В результате при удалении растворителя концентрация растворенного вещества в растворе повышается.

Обычно удаляют лишь часть растворителя с таким расчетом, чтобы раствор оставался в текучем состоянии и его можно было передавать в другой аппарат или потребителю. Иногда при выпаривании растворов твердых веществ происходит насыщение раствора и выпадение твердого вещества. В этом случае выпариванию сопутствует процесс кристаллизации.

Выпаривание до конечной концентрации может производиться как периодически, так и непрерывно. В последнем случае после выхода на режим (т.е. достижения в аппарате заданной конечной концентрации) в выпарной аппарат непрерывно вводят поток свежего раствора и выводят из него поток упаренного раствора, причем параметры ведения процесса остаются неизменными во времени.

Выпаривание до заданной концентрации может производиться как в одном аппарате, так и в нескольких (в так называемой многокорпусной установке) с увеличением концентрации раствора от корпуса к корпусу.

На процессы выпаривания расходуется огромное количество теплоты (в результате подвода теплоты на испарение). Выпаривание – крайне энергоемкий процесс, что предопределяет другую отличительную особенность процессов выпаривания – их металлоемкость. Поэтому для каждого конкретного случая выпаривания важно научиться выбирать оптимальную схему проведения процесса и наиболее подходящую конструкцию аппарата с тем, чтобы обеспечить максимальную

производительность установки при фиксированных затратах энергии и металла или минимальные затраты – при определенной производительности.

Целью технологического расчета выпарной установки является:

- определение расхода греющего пара на проведение процесса;
- определение поверхности теплообмена и основных размеров аппарата;
- выявление режимных характеристик процесса (температуры, давления, концентрации и т.д.);

Методика расчета выпарной установки зависит от выбранной технологической схемы, конструкции аппарата и способа ведения процесса (непрерывно или периодически).

5.2 Основные типы выпарных аппаратов

По рабочему давлению в корпусе (в последнем корпусе, если выпаривание производится в многокорпусной установке) выпарные аппараты разделяются на работающие под атмосферным давлением, под повышенным давлением и под разряжением.

По степени насыщения раствора различают выпарные аппараты для повышения концентрации вещества в области ниже насыщения (без кристаллизации) и с получением насыщенных (и перенасыщенных) растворов. В последнем случае конструкция аппарата отличается наличием камеры солеотделения для образующихся кристаллов.

По способу передачи теплоты: через теплопередающую поверхность или путем непосредственного контакта греющего агента с выпариваемым раствором (при выпаривании агрессивных жидкостей, разрушающих теплопередающую поверхность).

В таблице 1 приведена характеристика выпарных аппаратов.

Таблица 1 – Характеристика выпарных аппаратов

Вид	Разновидности	Достоинства	Недостатки	Область применения	Примечание
1	2	3	4	5	6
Аппараты с циркуляцией раствора	С естественной циркуляцией	Высокая интенсивность теплопередачи	Возможность инкрустации поверхности	Широкая	Возможно применение труб вскипания и камер для солеотделения
	С принудительной циркуляцией	Отсутствует инкрустация и поверхность	Дополнительный расход энергии на работу насоса	При выпаривании вязких и кристаллических растворов	
Аппараты с выпариваем жидкости за один проход по аппарату	С нисходящей пленкой	Фиксированное время пребывания в аппарате	Повышенная длина труб и высота аппарата в целом	При малой доле отгонки растворителя из вязких растворов	Возможно выпаривание термолабильных веществ
	С восходящей пленкой	Отсутствует распределитель жидкости по трубам		При большой доле отгонки растворителя	
	Роторный пленочный испаритель	Возможность выпаривания растворов до получения сухого остатка	дополнительный расход энергии. Сложность конструкции	При выпаривании очень вязких растворов или до твердого состояния	
Аппараты емкостного типа (с перемешиванием жидкости и без него)	Аппараты с поверхностью теплообмена в виде рубашки, змеевика и т.п.	Простота устройства	Низкий коэффициент теплопередачи. ограниченная поверхность теплообмена	В маломасштабных производствах	Возможность образования застойных зон

	Аппараты контактного типа (без разделяющей поверхности теплообмена): с погружной горелкой, обогрев горячим газом	Большая межфазная поверхность между газом и жидкостью	Необходимость внутренней футеровки антикоррозионными материалами: керамикой, резиной и др.	При выпаривании агрессивных жидкостей: серная и соляная кислоты, растворы минеральных солей	–
--	--	---	--	---	---

Наиболее типичные выпарные аппараты показаны на рисунке 5.1

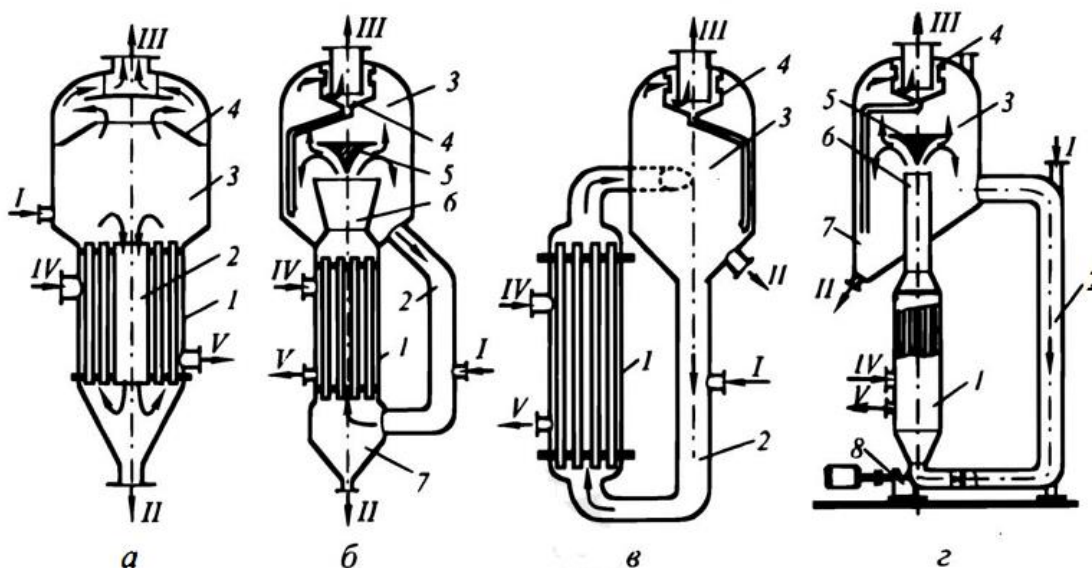


Рисунок 5.1 Выпарные аппараты с естественной (а-в) и принудительной (г) циркуляцией:

а – с центральной циркуляционной трубой, б – с вынесенной циркуляционной трубой, в – с вынесенной греющей камерой; 1 – греющая камера, 2 – циркуляционная труба, 3 – сепаратор, 4 – брызгоуловитель, 5 – отбойник, 6 – труба вскипания, 7 – солеотделитель, 8 – насос с электродвигателем; I – исходный раствор, II – упаренный раствор, III – вторичный пар, IV – греющий пар, V – конденсат.

Выпарные аппараты с циркуляцией раствора включают в себя греющую камеру 1, циркуляционную трубу 2, сепаратор 3 и брызгоуловитель 4 в верхней части последнего.

Подвод теплоты к раствору, кипящему в трубах греющей камеры, осуществляется за счет подачи в межтрубное пространство конденсирующегося водяного пара. Сепаратор и в ряде случаев расположенный в нижней части отбойник служат для разделения парожидкостной смеси, выходящей из нагревательных труб, на раствор и пар. Для более полной очистки вторичного пара от уносимых им капель раствора в верхней части сепаратора устанавливается брызгоуловитель.

Наличие циркуляционной трубы обеспечивает направленную естественную циркуляцию раствора: вниз по циркуляционной трубе и вверх – по кипяtilьным трубам. Циркуляция обусловлена разностью плотностей парожидкостной смеси (в кипяtilьных трубах) и раствора (в циркуляционной трубе).

В аппаратах с вынесенной циркуляционной трубой (рис. 5.1, б) кипения в трубах греющей камеры не происходит, упариваемый раствор лишь нагревается. При выходе перегретого раствора из этих труб он попадает в зону пониженного гидростатического давления (труба вскипания б), где и происходит интенсивное его закипание. Для обеспечения нормальной работы таких аппаратов очень важно отделить выкристаллизовавшиеся твердые частицы из циркулирующего потока раствора перед его входом в нагревательную камеру. Такое отделение твердых частиц происходит в солеотделителях, располагаемых либо в нижней части выпарного аппарата, либо в верхней.

Данный метод борьбы с инкрустацией эффективен, но не исключает ее полностью. Желательно не допустить инкрустации поверхности на всем пути движения раствора.

Этого можно добиться применением принудительной циркуляции раствора с помощью пропеллерного (осевого) или центробежного насоса 8 (рис. 5.1, г). Так как, во-первых, быстро циркулирующий раствор не успевает закристаллизовываться в трубах. Во-вторых, свежавыпавшие кристаллы (если таковые все же появляются) смываются потоком циркулирующего

раствора, движущегося с большой скоростью.

Для выпаривания термолабильных, а также вспенивающихся растворов используют пленочные аппараты (рис. 5.2), в которых выпаривание до требуемой конечной концентрации осуществляется за один проход кипящего раствора по кипяtilьным трубам. Жидкая пленка раствора движется прямоточно с образующимся вторичным паром. При этом различают нисходящий прямоток и восходящий. В последнем случае перемещение жидкостной пленки вверх происходит за счет поверхностного трения вторичного пара, движущегося с большой скоростью.

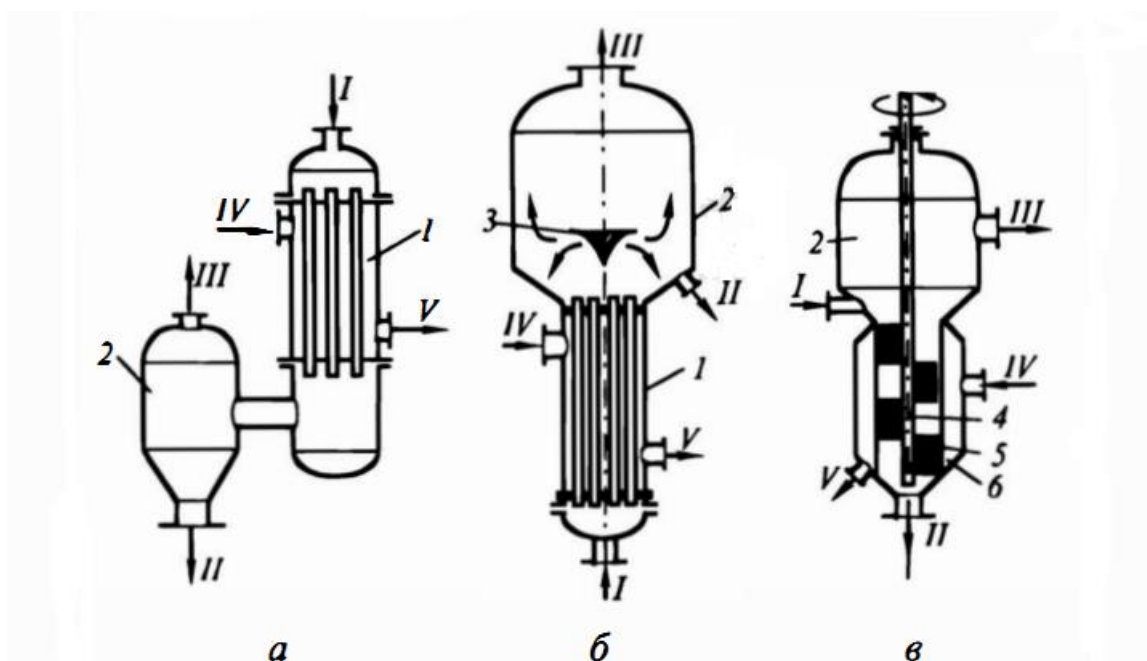


Рисунок 5.2 Пленочные выпарные аппараты:
а – с нисходящей пленкой, б – с восходящей пленкой, в – роторный пленочный испаритель; 1 – греющая камера, 2 – сепаратор, 3 – отбойник, 4 – ротор, 5 – лопасти, 6 – паровая рубашка

Аппарат работает следующим образом. Кипяtilьные трубы заполняются поступающим снизу раствором примерно на 1/4-1/5 их высоты. Подаваемый в межтрубное пространство греющий пар вызывает интенсивное кипение раствора в трубах. Скорость вторичного пара внутри труб настолько велика, что за счет сил трения на границе пар-жидкость он увлекает тонкую пленку раствора, перемещая ее вверх до сепаратора, где происходит отделение пара от упаренного раствора.

Для выпаривания термолабильных и вязких растворов, а также при необходимости ведения процесса до получения сухого остатка все более широкое применение находят роторные пленочные испарители (рис.5.2, в). Основным рабочим органом в них является ротор – вертикальный вал с насаженными на него лопастями. При вращении ротора лопасти частично срезают пленку жидкости, образуя утолщение перед ними. Утолщенная пленка стекает вниз с большей скоростью, нежели естественная пленка. Таким образом, вращающийся ротор способствует перемещению раствора вниз. Обогрев аппарата производится с помощью нагревательной рубашки б для теплоносителя, а образующийся при кипении раствора вторичный пар движется вверх – противотоком к стекающей жидкости – и отводится через сепаратор.

Гужель Юлия Александровна,

доцент кафедры «Химия и химическая технология» АмГУ, канд. техн. наук

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие. Часть вторая. Тепловые процессы и аппараты

Изд-во АмГУ. Подписано к печати ____.____.2020.

Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,61

Тираж 50. Заказ