

Лекция 29. Теплообменные аппараты. Основные сведения

Классификация теплообменных аппаратов

Теплообменные аппараты (теплообменники) – это устройства, в которых теплота переходит от одной среды к другой.

Теплообмен между теплоносителями является одним из наиболее важных и часто используемых в технике процессов. Например, получение пара заданных параметров в парогенераторе основано на процессе передачи теплоты от одного теплоносителя к другому. В конденсаторах и градирнях тепловых электростанций, воздухоподогревателях доменных печей и многочисленных теплообменных устройствах химической промышленности основным рабочим процессом является процесс теплообмена между теплоносителями. По принципу действия теплообменные аппараты могут быть разделены на рекуперативные, регенеративные и смесительные. Выделяются еще теплообменные устройства, в которых нагрев или охлаждение теплоносителя осуществляется за счет внутренних источников теплоты.

Рекуперативные теплообменные аппараты представляют собой устройства, в которых две жидкости с различными температурами текут в пространстве, разделенном твердой стенкой. Теплообмен происходит за счет конвекции и теплопроводности стенки, а если хоть одна из жидкостей является излучающим газом, то и за счет теплового излучения. Примером таких аппаратов являются котлы, подогреватели, конденсаторы выпарные аппараты и др.

Регенераторы – такие теплообменные аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева через определенные промежутки времени омывается то горячей, то холодной жидкостью. Сначала поверхность регенератора отбирает теплоту от горячей жидкости и нагревается, затем поверхность регенератора отдает энергию холодной жидкости. Таким образом, в регенерато-

рах теплообмен всегда происходит в нестационарных условиях, тогда как рекуперативные теплообменные аппараты большей частью работают в стационарном режиме. Типичным примером регенеративных аппаратов являются воздухоподогреватели мартеновских и доменных печей.

Так как в регенеративных и рекуперативных аппаратах процесс передачи теплоты неизбежно связан с поверхностью твердого тела, то их еще называют поверхностными.

В *смесительных* аппаратах теплопередача осуществляется при непосредственном контакте и смешении горячей и холодной жидкостей. Типичным примером таких теплообменников являются градирни тепловых электрических станций. В градирнях вода охлаждается атмосферным воздухом. Воздух непосредственно соприкасается с водой и перемешивается с паром, возникающим из-за частичного испарения воды.

В *теплообменниках с внутренними источниками* энергии применяются не два, как обычно, а один теплоноситель, который отводит теплоту, выделенную в самом аппарате. Примером таких аппаратов могут служить ядерные реакторы, электронагреватели и другие устройства. Независимо от принципа действия теплообменные аппараты, применяющиеся в различных областях техники, как правило, имеют свои специальные названия. Эти названия определяются технологическим назначением и конструктивными особенностями теплообменных устройств. Однако с теплотехнической точки зрения все аппараты имеют одно назначение – передачу теплоты от одного теплоносителя к другому или поверхности твердого тела к движущимся теплоносителям. Последнее и определяет те общие положения, которые лежат в основе теплового расчета любого теплообменного аппарата.

Основные положения и уравнения теплового расчета

Тепловые расчеты теплообменных аппаратов могут быть проектными и поверочными.

Проектные (конструктивные) тепловые расчеты выполняются при проектировании новых аппаратов, целью расчета является определение поверхности теплообмена.

Поверочные тепловые расчеты выполняются в случае, если известна поверхность нагрева теплообменного аппарата и требуется определить количество переданной теплоты и конечные температуры рабочих жидкостей. Тепловой расчет теплообменных аппаратов сводится к совместному решению уравнений теплового баланса и теплопередачи. Эти два уравнения лежат в основе любого теплового расчета.

Уравнения теплового баланса и теплопередачи, будучи едиными по существу, различны в деталях в зависимости от типа рассматриваемого теплообменника (рекуперативный, регенеративный или смешительный). Ниже названные уравнения приводятся для рекуперативных теплообменников.

Будем рассматривать стационарный режим работы теплообменника.

Уравнение теплового баланса. Изменение энтальпии теплоносителя вследствие теплообмена определяется соотношением

$$dQ = G di,$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с; i – удельная энтальпия, Дж/кг; dQ измеряется в Дж/с или Вт.

Если теплота первичного (горячего) теплоносителя воспринимается вторичным (холодным), то уравнение теплового баланса без учета потерь теплоты запишется как

$$dQ = -G_1 di_1 = G_2 di_2$$

или для конечного изменения энтальпии

$$Q = G_1 (i_1' - i_1'') = G_2 (i_2'' - i_2'),$$

здесь и в дальнейшем индекс «1» означает, что данная величина отнесена к горячей жидкости, а индекс «2» – к холодной. Обозначение (штрих) соответствует данной величине на входе в теплообменник, (два штриха) — на выходе из него.

Полагая, что изобарная теплоемкость теплоносителя $c_p = \text{const}$ и $di = c_p dt$, то

$$\begin{aligned} dQ &= G c_p dt; \\ Q &= G_1 c_p (t_1' - t_1'') \eta_{\text{пот}} = G_2 c_p (t_2'' - t_2'), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где $\eta_{\text{пот}}$ – коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Удельная теплоемкость c_p зависит от температуры. Поэтому в практических расчетах в уравнение (5.1) подставляется среднее значение изобарной теплоемкости в интервале температур от t_1' до t_1'' .

В тепловых расчетах часто пользуются понятием водяного эквивалента (Вт/К), определяемого выражением

$$W = c_p G.$$

Из (5.1) следует (при $\eta_{\text{пот}} = 1$), что

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}. \quad (5.2)$$

Последнее уравнение указывает на то, что отношение изменений температур однофазных теплоносителей обратно пропорционально отношению их водяных эквивалентов. Нетрудно видеть, что при изменении агрегатного состояния теплоносителя температура его сохраняется постоянной и δt будет равно нулю. Следовательно, для такого теплоносителя водяной эквивалент $W = \infty$.

Соотношение (5.2) справедливо как для конечной поверхности теплообмена F , так и для любого элементарного участка dF , т. е.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{dt_2}{dt_1}.$$

Уравнение теплопередачи. Чаще всего для определения поверхности теплообмена используют следующее уравнение:

$$Q = k(t_1 - t_2)F, \quad (5.3)$$

где k – коэффициент теплопередачи; t_1 и t_2 – соответственно температуры первичного и вторичного теплоносителей; F – площадь поверхности теплопередачи.

Уравнение (5.3) справедливо в предположении, что t_1 и t_2 остаются постоянными по всей поверхности теплообмена, однако эти условия выполняются только в частных случаях. В общем случае t_1 и t_2 изменяются по поверхности и, следовательно, изменяется и температурный напор $\Delta t = t_1 - t_2$. Изменяется и коэффициент теплоотдачи по поверхности теплообмена. Значения Δt и k можно принять постоянными только в пределах элементарной площадки поверхности теплообмена dF . Следовательно, уравнение теплопередачи справедливо лишь в дифференциальной форме для элемента поверхности теплообмена:

$$dQ = k\Delta t dF.$$

Общий тепловой поток через поверхность теплообмена определится интегралом

$$Q = \int_0^F k\Delta t dF. \quad (5.4)$$

Для решения последнего уравнения необходимо знать закон изменения Δt и k по поверхности. Коэффициент теплопередачи k , в большинстве случаев изменяется незначительно и его можно принять постоянным. Для случаев, когда коэффициент теплопередачи существенно изменяется на отдельных участках поверхности теплообмена, его усредняют:

$$k = \frac{F_1 k_1 + F_2 k_2 + \dots + F_n k_n}{\sum_{i=1}^n F_i}.$$

Приняв таким образом постоянное значение коэффициента теплопередачи по всей поверхности, уравнение (5.4) можно записать в виде

$$Q = \bar{k} \int_0^F \Delta t dF.$$

Если последнее уравнение умножить и разделить на F , то получим:

$$Q = \bar{k} \left(\frac{1}{F} \int_0^F \Delta t dF \right) F = \bar{k} \overline{\Delta t} F. \quad (5.5)$$

Выражение (5.5) является вторым основным уравнением при тепловом расчете теплообменных аппаратов и называется *уравнением теплопередачи*.

При конструктивном расчете теплообменных устройств тепловая производительность Q , задается; требуется определить площадь поверхности теплообмена F . Последняя найдется из уравнения (5.5):

$$F = \frac{Q}{\bar{k} \overline{\Delta t}}.$$

Из этого уравнения следует, что при нахождении поверхности теплообмена задача сводится к вычислению коэффициента теплопередачи $\bar{k}$ и усредненного по всей поверхности температурного напора $\overline{\Delta t}$.

Например, для плоской стенки, коэффициент теплопередачи:

$$\bar{k} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 могут учитывать не только конвективную теплопередачу, но и теплопередачу излучением. В этом случае $\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{рад}}$.

Член в знаменателе $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ представляет собой полное термическое сопротивление теплопроводности твердой стенки, разделяющей теплоносители. Разделяющая стенка может быть как многослойной, так и однослойной.

При рассмотрении теплообменных аппаратов с непрерывно изменяющейся температурой теплоносителей следует различать аппараты (рис. 5.1):

1) *в зависимости от направления движения теплоносителей:*

- прямоточные (рис. 5.1,а) – теплоносители движутся параллельно в одном направлении;
- противоточные (рис. 5.1,б) – теплоносители движутся параллельно в противоположных направлениях;
- теплообменники с перекрестным током – теплоносители движутся во взаимно перпендикулярных направлениях, при этом возможен однократный (рис. 5.1,в) и многократный (рис. 5.1,г) перекрестный ток. Возможны также сложные схемы движения теплоносителей (рис. 5.1,д,е);

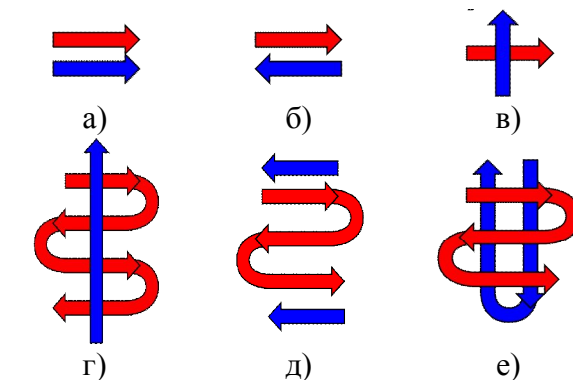


Рис. 5.1. Схемы движения теплоносителей
в теплообменниках

2) *в зависимости от формы рабочей поверхности:*

- трубчатые – один из теплоносителей движется внутри труб, другой омывает эти трубы снаружи;
- пластинчатые – рабочая поверхность таких теплообменников образована набором параллельных плоских пластин. Каналы между пластинами

объединены через один общими коллекторами и образуют, таким образом, полости для каждого из теплоносителей.

3) по способу использования:

- регенераторы – теплообменники, предназначенные для утилизации теплоты в газотурбинных установках;
- радиаторы – теплообменники для рассеивания теплоты горячей воды в окружающее пространство (например, в системе охлаждения автомобильного двигателя).
- воздухоподогреватели;
- маслоохладители;
- пароперегреватели, и т.д.

Средняя разность температур и методы ее вычисления

Изменение температур рабочих жидкостей для простейших случаев можно получить аналитическим путем. Рассмотрим простейший теплообменный аппарат, работающий по схеме прямотока (рис. 5.2). Для элемента поверхности теплообмена dF уравнение теплопередачи запишется как

$$dQ = k(t_1 - t_2)dF = k\Delta t F. \quad (a)$$

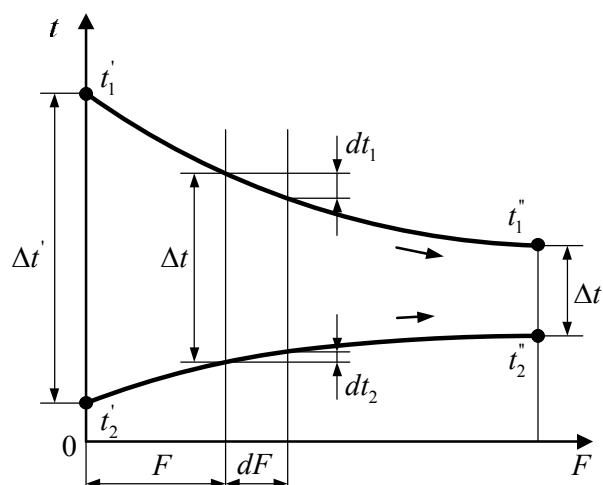


Рис. 5.2. Изменение температур теплоносителей
вдоль поверхности теплообмена

При этом температура первичного теплоносителя понизится на dt_1 , а вторичного повысится на dt_2 . Следовательно,

$$dQ = -W_1 dt_1 = W_2 dt_2,$$

откуда

$$dt_1 = -\frac{dQ}{W_1} \text{ и } dt_2 = \frac{dQ}{W_2}.$$

Изменение температурного напора при этом

$$d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2 = -\left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}\right)dQ = -mdQ, \quad (б)$$

где

$$m = \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2}\right).$$

Подставив в уравнение (б) значение dQ из уравнения теплопередачи (а), найдем:

$$d(t_1 - t_2) = -mk(t_1 - t_2)dF.$$

Обозначив $(t_1 - t_2) = \Delta t$ последнее уравнение запишем как

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -mkdF.$$

Принимая m и k постоянными, проинтегрируем последнее уравнение от 0 до F и от $\Delta t'$ до $\Delta t''$:

$$\int_{\Delta t'}^{\Delta t''} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -mk \int_0^F dF.$$

После интегрирования получим:

$$\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = -mkF$$

или

$$\Delta t'' = \Delta t' e^{-mkF}. \quad (5.6)$$

Из уравнения (5.6) следует, что вдоль поверхности теплообмена температурный напор изменяется по экспоненциальному закону.

Выражение для расчета средней разности температур можно записать в виде:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}}. \quad (5.7)$$

Формулу (5.7) часто записывают в следующем виде

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (5.8)$$

где Δt_6 – большая разность температур; Δt_m – меньшая разность температур.

Формула (5.8) может быть использована как при прямотоке, так и при противотоке.

Полученная разность температур (5.8) называется *среднелогарифмическим температурным напором*.

В случаях, когда температура теплоносителей вдоль поверхности теплообмена изменяется незначительно, среднюю разность температур можно с достаточной степенью точности вычислить как *среднюю арифметическую*:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2}. \quad (5.9)$$

Значения Δt_6 и Δt_m следует рассчитывать, согласно рис. 5.3.

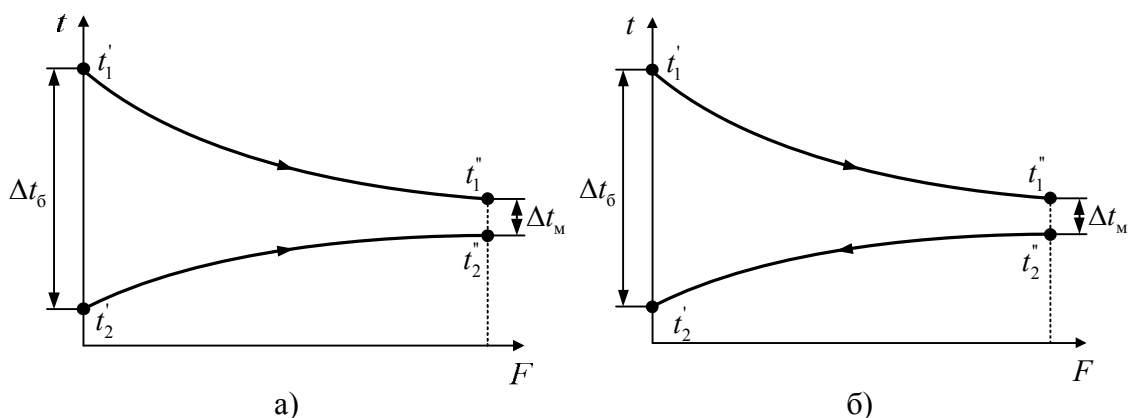


Рис. 5.3. Изменение температур вдоль поверхности теплообмена:
а) при прямоточной; б) противоточной схемах течения теплоносителей

Так как значения среднеарифметического температурного напора всегда больше среднелогарифмического напора, то температурную разность можно вычислять с достаточной точностью по (5.9) при $\Delta t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}} < 2$.