ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Классификация теплообменных аппаратов

Устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой, называются теплообменниками. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на *рекуперативные, регенеративные и смесительные*. Существуют также теплообменники, в которых нагрев или охлаждение теплоносителя происходит за счет внутренних источников теплоты.

Устройства, в которых две среды с различными температурами движутся в пространстве, разделенном твердой стенкой, называются *рекуперативными теплообменными аппаратами.* В таких аппаратах процесс передачи теплоты происходит за счет конвекции и теплопроводности через разделяющую стенку. Если при этом хотя бы один из теплоносителей является излучающим газом, то передача теплоты происходит и излучением. Примерами таких теплообменников можно назвать котлы, подогреватели, конденсаторы и т.п.

К *регенеративным аппаратам* относятся такие аппараты, в которых одна и та же поверхность через определенные промежутки времени омывается попеременно то горячей, то холодной средой. Процесс теплообмена происходит в нестационарных условиях: поверхность теплообмена сначала отбирает теплоту от горячей среды и нагревается, а затем нагретая поверхность отдает теплоту холодной среде. Примерами могут служить вращающиеся и переключающиеся регенеративные теплоутилизаторы систем вентиляции.

Общим для рекуперативных и регенеративных теплообменников является то, что передача теплоты в них осуществляется через поверхность твердого тела. Такие теплообменники называются *поверхностными*.

В *смесительных теплообменниках* процесс теплообмена осуществляется при непосредственном смешивании теплоносителей. Примером могут служить градирни, в которых падающие капли воды охлаждаются атмосферным воздухом. При этом воздух непосредственно соприкасается с водой и перемешивается с паром, возникающим из-за частичного испарения воды.

В *теплообменниках с внутренним источником энергии* применяется один теплоноситель, который отводит теплоту, выделившуюся в аппарате. Примером могут служить электронагреватели.

Основные принципы теплового расчета теплообменных аппаратов

Расчеты теплообменников бывают *проектные и поверочные*.

Проектные выполняют при разработке новых теплообменных аппаратов с целью определения размера поверхности теплообмена.

Поверочные выполняют при известной поверхности теплообмена с целью определения параметров теплоносителей и количества передаваемой теплоты.

Методики расчета сводятся к решению уравнений теплового баланса и теплообмена, основанных на законах сохранения массы и энергии

Расчет рекуперативных теплообменников

Рассмотрим расчет *рекуперативных теплообменников* для стационарного процесса.

Изменение энтальпии теплоносителя при теплообмене определяется следующим уравнением:

$$dQ = Gdi$$

$G -$ расход, кг/с;

$i -$ удельная энтальпия, Дж/кг.

При $G = const$

$$Q = G\int_{i'}^{i''} di = G(i'' - i')$$

i' и i'' – начальная и конечная энтальпия теплоносителя.

Для горячего теплоносителя используем индекс «1», для холодного – «2»; для параметров на входе в теплообменник – «’», на выходе – «”».

Тогда уравнение теплового баланса примет вид:

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

Или после интегрирования:

$$Q = G_1(i''_1 - i'_1) = G_2(i''_2 - i'_2)$$

Принимая $c_p = const$ и $di = c_p dt$ получим:

$$dQ = Gc_p dt \qquad Q = Gc_p(t'' - t')$$

$$Q = G_1 c_{p1}(t'_1 - t''_1) = G_2 c_{p2}(t''_2 - t'_2)$$

Т.к. $c_p = f(t)$, то при расчетах в уравнения подставляются среднее значение в диапазоне температур от t' до t''

Иногда в расчетах используют *полную теплоемкость*, называемую *водяным эквивалентом*:

$$C = Gc_p$$

Тогда получим:

$$\frac{G_1 c_{p1}(t'_1 - t''_1)}{G_2 c_{p2}(t''_2 - t'_2)} = 1{,}0; \qquad \frac{G_1 c_{p1}}{G_2 c_{p2}} = \frac{(t''_2 - t'_2)}{(t'_1 - t''_1)}$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{(t''_2 - t'_2)}{(t'_1 - t''_1)} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} \qquad (1)$$

Таким образом, отношение изменения температур теплоносителей обратно пропорционально отношению их водяных эквивалентов. При изменении агрегатного состояния вещества

δt будет равняться нулю.

Следовательно, для такого теплоносителя водяной эквивалент

$$C = \infty$$

Уравнение (1) справедливо для конечной поверхности теплообмена

F и для любого элементарного участка dF

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{dt_2}{dt_1}$$

:

Рассмотрим уравнение теплопередачи:

$$Q = kF(t_1 - t_2) \qquad (2)$$

$k -$ коэффициент теплопередачи;

$t_1, t_2 -$ температуры теплоносителей;

$F -$ поверхность теплообмена

Уравнение (2) справедливо при постоянстве температур

$$t_1, t_2$$

по всей поверхности. При переменных температурах изменяется и температурный напор

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

и коэффициент теплопередачи. Тогда: $dQ = k\Delta t dF$

Интегрируя, получим полный тепловой поток через поверхность теплообмена:

$$Q = \int_0^F k\Delta t dF$$

Изменение k по поверхности теплообмена на практике часто незначительно, и этим изменением пренебрегают. Если зависимость существенна, то площадь поверхности теплообмена разбивают на несколько участков со своими коэффициентами и затем усредняют:

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

Тогда

:

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

Разделим и умножим на F $$Q = \bar{k}\left(\frac{1}{F}\int_0^F \Delta t dF\right)F = \bar{k}\Delta\bar{t}F$$

$\Delta\bar{t}$: – средний температурный напор.

Уравнение также является основным уравнением при расчете теплообменников. При проектном расчете задается их теплопроизводительность Q , Вт.

Требуется определить поверхность F , м2 теплообмена

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

В общем случае коэффициент теплоотдачи вен: $$\alpha_1 = \alpha_{k1} + \alpha_{p1}$$

α_{k1} α_{p1} – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением.

Коэффициент теплопередачи для плоской поверхности теплообмена:

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

$\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – полное термическое сопротивление стенки, состоящей из n слоев.

При рассмотрении теплообменников с непрерывно меняющейся температурой теплоносителей различают теплообменники следующих типов (рис):

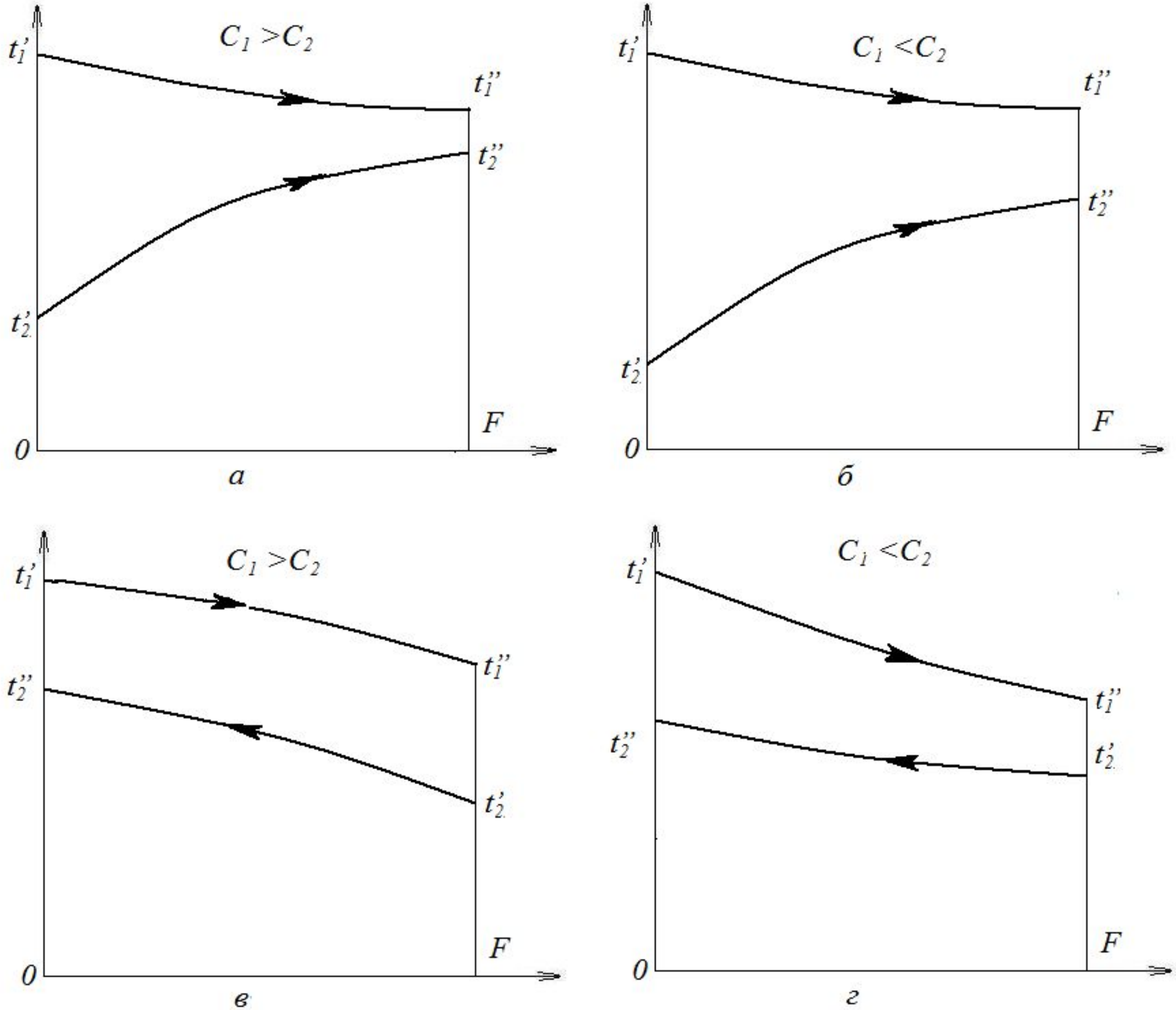
– прямого тока;

– противоточные;

– перекрестного тока;

– со сложным движением теплоносителей (смешанного типа).

Если движение теплоносителей параллельно в одном направлении (рис.а), то такая схема называется *прямотоком*. Если движение теплоносителей параллельно в противоположном направлении (рис.б), *противотоком.* Если движение теплоносителей перпендикулярно друг другу (рис.в), *перекрестным током.* При наличии различных направлений движения потоков – схема называется *смешанной* (рис.г).



Изменение температуры теплоносителей в теплообменниках
а – прямоточных; *б* – противоточных; *в* – перекрестного тока; *г* – смешанных

Изменение температуры теплоносителей вдоль поверхности определяется схемой движения и соотношением водяных эквивалентов теплоносителей.

Рассмотрим прямоточный теплообменник. Для элемента поверхности запишем:

$$dQ = k\Delta t dF = -C_1 dt_1 = C_2 dt_2$$

$$dt_1 = -\frac{dQ}{C_1};$$

$$dt_2 = -\frac{dQ}{C_2};$$

Изменение температурного напора будет иметь вид:

$$d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2$$

$$d(t_1 - t_2) = -\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) dQ = -m dQ$$

$$m = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

$$d(t_1 - t_2) = -mk(t_1 - t_2) dF = -mk\Delta t dF$$

Принимая m и k постоянными, получим:

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

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

$\Delta t'$ – температурный напор на входе в теплообменник

Тогда

$$\Delta t = \Delta t' \exp(-mkF) \qquad (3)$$

Таким образом, температурный напор изменяется вдоль поверхности теплообмена по экспоненциальному закону.

В противоточных теплообменниках температура вдоль

F убывает, и уравнение теплового баланса имеет вид:

$$dQ = -C_1 dt_1 = -C_2 dt_2$$

Изменение температурного напора будет иметь вид:

$$d(t_1 - t_2) = -m dQ$$

$$m = \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2}\right)$$

.

Поэтому Δt по ходу движения первичной среды уменьшается при

$C_1 < C_2 (m > 0)$ и увеличивается при $C_1 > C_2 (m < 0)$

Среднюю разность температур находим по формуле:

$$\Delta t = \frac{1}{F}\int_0^F \Delta t dF$$

$\Delta t -$ локальное значение температурного напора $(t_1 - t_2)$

Интегрируя, получим:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{F}\int_0^F \exp(-mkF)dF = \frac{\Delta t'}{-mkF}\left[\exp\left(-mkF\right)-1\right]$$

После преобразований получим:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t'}{\ln\left(\Delta t / \Delta t'\right)}\left(\frac{\Delta t}{\Delta t'} - 1\right) = \frac{\Delta t - \Delta t'}{\ln\left(\Delta t / \Delta t'\right)}$$

Если усреднение происходит по всей поверхности теплообмена, то

$$\Delta t = \Delta t''$$

то:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln\left(\Delta t'' / \Delta t\right)}$$

или *среднелогарифмический температурный напор*:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln\left(\Delta t_б / \Delta t_м\right)} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{2{,}3\lg(\Delta t_б / \Delta t_м)}$$

$\Delta t_б, \Delta t_м$ – большая и меньшая разность температур.

При противотоке, если $C_1 = C_2 (m = 0)$, то температурный напор сохраняется вдоль поверхности. При незначительном изменении температуры вдоль поверхности вместо среднеинтегральной используют среднеарифметическую:

$$\Delta\bar{t} = \frac{1}{2}\left(\Delta t_{б} + \Delta t_{м}\right) = \frac{\Delta t_{б}}{2}\left(1 + \frac{\Delta t_{м}}{\Delta t_{б}}\right)$$

При сложных схемах движения теплоносителей сначала вычисляют температурный напор:

$$\Delta\bar{t}_{прот} = \frac{\Delta t_{б} - \Delta t_{м}}{\ln\left(\Delta t_{б} / \Delta t_{м}\right)}$$

Затем вспомогательные величины:

$$P = \frac{t''_{2} - t'_{2}}{t'_{1} - t'_{2}} = \frac{\delta t_{2}}{\Delta t_{\max}}$$

$$R = \frac{t'_{1} - t''_{1}}{t''_{2} - t'_{2}} = \frac{\delta t_{1}}{\delta t_{2}}$$

Используя справочный материал, по данным P и R

определяется поправка $\varepsilon_{\Delta t} = f(P, R)$
и температурный напор вычисляется по
формуле:

$$\Delta \bar{t} = \Delta \bar{t}_{прот} \varepsilon_{\Delta t}$$

При поверочном расчете при заданных значениях t'_1, t'_2, F, k
требуется определить t''_1, t''_2, Q (тепловую производительность).

В основе расчета остаются те же уравнения, что и при проектном расчете. Допустим, что температура вдоль поверхности теплообмена изменяется незначительно,

$$\Delta t_б / \Delta t_м < 2$$

и распределение температуры имеет линейный характер.
Тогда:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_б + \Delta t_м}{2} = \left(\frac{t'_1 + t''_1}{2} - \frac{t'_2 + t''_2}{2} \right) \qquad (4)$$

Уравнение теплового баланса:

$$Q = C_1 \delta t_1 = C_2 \delta t_2$$

Определяем t''_1 и t''_2

:

$$t''_1 = t'_1 - \frac{Q}{C_1}; \qquad t''_2 = t'_2 + \frac{Q}{C_2}; \qquad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получим:

$$\Delta \bar{t} = \left(t'_1 - t'_2\right) - \left(\frac{1}{2C_1} + \frac{1}{2C_2}\right) Q$$

Определим тепловую производительность:

$$Q = k \Delta \bar{t} F = \frac{\left(t'_1 - t'_2\right)}{\left(1/kF\right) + \left(1/2C_1\right) + \left(1/2C_2\right)}$$

Подставляя Q, определим значения

t''_1 и t''_2

Однако эта методика может быть использована для приближенных расчетов, т.к. распределение температур теплоносителей имеет нелинейный характер. При прямоточном движении теплоносителей используем уравнение (3). Тогда:

$$\frac{t''_1 - t''_2}{t'_1 - t'_2} = \exp(-mkF) = \exp\left[-kF\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)\right] = \exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)\right]$$

ычтем из левой и правой частей уравнения ицу:

$$\frac{t''_1 - t''_2}{t'_1 - t'_2} - 1 = \exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)\right] - 1$$

Тогда

:

$$\frac{t''_1 - t''_2 - t'_1 + t'_2}{t'_1 - t'_2} = \exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)\right] - 1$$

Преобразуем к

виду:

$$t''_1 - t''_2 - t'_1 + t'_2 = (t'_1 - t'_2)\left\{\exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)\right] - 1\right\}$$

Отсюда:

$$(t''_1 - t'_1) + (t''_2 - t'_2) = (t'_1 - t'_2)\left\{1 - \exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)\right]\right\}$$

И окончательно имеем:

$$\delta t_1 + \delta t_2 = \Delta t' \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)\right]\right\}$$

Неизвестные величины δt_1 и δt_2 определяются из уравнения теплового баланса:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

Тогда: $\delta t_2 = \delta t_1 \dfrac{C_1}{C_2}$

Получаем уравнение для нахождения δt_1

$$\delta t_1 + \delta t_1 \frac{C_1}{C_2} = \Delta t' \frac{1 - \exp\left[-\left(kF / C_1\right)\left(1 + C_1 / C_2\right)\right]}{\left(1 + C_1 / C_2\right)}$$

Аналогично определяется величина δt_2

$$\delta t_2 = \Delta t' \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1 - \exp\bigl[-\bigl(kF / C_1\bigr)\bigl(1 - C_1 / C_2\bigr)\bigr]}{\bigl(1 + C_1 / C_2\bigr)}$$

:

Для противоточного движения теплоносителей в качестве исходного уравнения принимается:

$$\frac{t''_1 - t''_2}{t'_1 - t'_2} = \exp\left[-\frac{kF}{C_1}\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right)\right]$$

Вывод уравнений аналогичен случаю прямотока. Окончательно имеем:

$$\delta t_1 = (t'_1 - t'_2)\frac{1 - \exp\bigl[-\bigl(kF / C_1\bigr)\bigl(1 - C_1 / C_2\bigr)\bigr]}{1 - \bigl(C_1 / C_2\bigr)\exp\bigl[-(kF / C_1)(1 - C_1 / C_2\bigr]}$$

$$\delta t_2 = (t'_1 - t'_2)\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1 - \exp\bigl[-\bigl(kF / C_1\bigr)\bigl(1 - C_1 / C_2\bigr)\bigr]}{1 - \bigl(C_1 / C_2\bigr)\exp\bigl[-(kF / C_1)(1 - C_1 / C_2\bigr]}$$

Количество переданной теплоты для противотока и прямотока определяется:

$$Q = C_1 \delta t_1$$

Для оценки преимущества противотока перед прямотоком сравним значения Q при равенстве прочих условий. Прямоточная и противоточная схемы в энергетическом отношении могут быть одинаковы при условии, что

C_1 / C_2 либо очень мало, либо очень велико, а также очень мало должно быть выражение kF / C_1

Если C_1 / C_2

очень велико, значит изменение температуры одного из теплоносителей также незначительно. Если

$$C_1 / C_2$$

очень мало, тогда температурный напор велик по сравнению с изменением температуры рабочей жидкости. Во всех остальных случаях при прямотоке количество переданной теплоты меньше, чем при противотоке.

При известном распределении теплового потока по поверхности теплообмена температуры поверхности рассчитывают по формуле для плоских многослойных стенок:

$$t_{ст} = t_{ж1} - q\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right)$$

$$t_{ст} = t_{ж2} + q\left(\frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right)$$

Для цилиндрических стенок:

$$t_{c1} = t_{ж1} - \frac{q_l}{\pi}\frac{1}{\alpha_1 d_1}$$

$$t_{c2} = t_{ж2} - \frac{q_l}{\pi}\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}\right)$$

Расчет регенеративных теплообменников

Поверхность этих аппаратов попеременно является теплоотдающей и тепловоспринимающей. Время полного цикла теплообмена:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

где τ_1 и τ_2 – периоды соответственно нагрева и охлаждения.

$$Q = k_n(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)$$

Т.к. процессы в регенеративных теплообменниках нестационарные, то для инженерных расчетов применяются приближенные методы. Тепловой поток относится к циклу. Уравнение теплопередачи имеет вид:

k_n – коэффициент теплопередачи за период нагрева и охлаждения;

$\bar{t}_1$ – средняя температура первичного теплоносителя за период нагревания;

$\bar{t}_2$ – средняя температура вторичного теплоносителя за период охлаждения.

Количество переданной к единице поверхности теплоты за период нагревания:

$$Q_1 = \alpha_1 \tau_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_{c1})$$

где α_1 – суммарный коэффициент теплоотдачи за период нагревания;

$\bar{t}_1$ и $\bar{t}_{c1}$ – средние температуры первичного теплоносителя и поверхности за период нагревания.

Аналогично количество теплоты, отданное вторичному теплоносителю за период охлаждения:

$$Q_2 = \alpha_2 \tau_2 (\bar{t}_{c2} - \bar{t}_2)$$

где α_2 – суммарный коэффициент теплоотдачи за период охлаждения;

$\bar{t}_2$ и $\bar{t}_{c2}$ – средние температуры вторичного теплоносителя и поверхности за период охлаждения.

При установившемся состоянии $Q_1 = Q_2$ или:

$$\alpha_1 \tau_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_{c1}) = \alpha_2 \tau_2 (\bar{t}_{c2} - \bar{t}_2)$$

Обозначим: $\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2} = \Delta \bar{t}_c$

Тогда: $\bar{t}_{c2} = \bar{t}_{c1} - \Delta \bar{t}_c$

Преобразуя, имеем:

$$\alpha_1 \tau_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_{c1}) = \alpha_2 \tau_2 (\bar{t}_{c1} - \Delta \bar{t}_c - \bar{t}_2)$$ или:

$$\alpha_1 \tau_1 \bar{t}_1 - \alpha_1 \tau_1 \bar{t}_{c1} = \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_{c1} - \alpha_2 \tau_2 \Delta \bar{t}_c - \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_2$$

Отсюда:

$$\alpha_1 \tau_1 \bar{t}_{c1} + \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_{c1} = \alpha_1 \tau_1 \bar{t}_1 + \alpha_2 \tau_2 \Delta \bar{t}_c + \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_2$$ или:

$$(\alpha_1 \tau_1 + \alpha_2 \tau_2) \bar{t}_{c1} = \alpha_1 \tau_1 \bar{t}_1 + \alpha_2 \tau_2 \Delta \bar{t}_c + \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_2$$

Тогда

:

$$\bar{t}_{c1} = \frac{\alpha_1 \tau_1 \bar{t}_1 + \alpha_2 \tau_2 \Delta \bar{t}_c + \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_2}{\alpha_1 \tau_1 + \alpha_2 \tau_2}$$

после преобразований, получим:

$$k_n = \frac{\alpha_1 \tau_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_{c1})}{\bar{t}_1 - \bar{t}_2} =$$

$$= \frac{\alpha_1 \tau_1 (\bar{t}_1 - (\alpha_1 \tau_1 \bar{t}_1 + \alpha_2 \tau_2 \Delta \bar{t}_c + \alpha_2 \tau_2 \bar{t}_2)/(\alpha_1 \tau_1 + \alpha_2 \tau_2))}{\bar{t}_1 + \bar{t}_2} =$$

$$= \frac{1}{(1/\alpha_1 \tau_1) + (1/\alpha_2 \tau_2)} \left[1 - \frac{\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2}}{\bar{t}_1 - \bar{t}_2} \right]$$

Пусть продолжительность периодов нагрева и охлаждения равна единице, а разность температур

$$\bar{t}_{c1} - \bar{t}_{c2} = 0$$

Тогда получим уравнение, аналогичное уравнению коэффициента теплоотдачи для рекуператора:

$$k_n = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{1}{\alpha_2}}$$

Таким образом, в рассматриваемом случае формулы расчета средних за период температур и теплопередачи в рекуператорах справедливы и для регенераторов. Если принять

$$\Delta\bar{t}_c = 0$$

при любой продолжительности периодов нагрева и охлаждения, то

$$k_{ид} = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1\tau_1} + \dfrac{1}{\alpha_2\tau_2}}$$

где $k_{ид}$ — коэффициент теплоотдачи «идеального» регенератора, в котором средняя температура поверхности в период нагрева и охлаждения остается одинаковой.

Таким образом, при известных α_1 и α_2

расчет регенератора сводится к определению средних температур поверхности в период нагревания $\bar{t}_{c1}$

и в период охлаждения $\bar{t}_{c2}$