

**В.А. Григорьев, Т.А. Колач**

**Краткий справочник по теплообменным  
аппаратам**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621.3  
ББК 31.352  
В11

В11 **В.А. Григорьев**  
Краткий справочник по теплообменным аппаратам / В.А. Григорьев, Т.А. Колач – М.: Книга по Требованию, 2021. – 256 с.

**ISBN 978-5-458-36145-3**

**ISBN 978-5-458-36145-3**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2021  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава первая. Основы расчета теплообменных аппаратов . . . . .</b>	<b>7</b>
1-1. Классификация теплообменных аппаратов . . . . .	7
1-2. Тепловые расчеты рекуперативных теплообменных аппаратов . . . . .	8
1-3. Выпарные установки . . . . .	23
1-4. Ректификационные установки . . . . .	29
1-5. Абсорбционные установки . . . . .	30
1-6. Гидравлический расчет . . . . .	30
1-7. Расчет на прочность . . . . .	31
<b>Глава вторая. Теплообменные аппараты для теплофикационных и энергетических установок . . . . .</b>	<b>36</b>
2-1. Теплообменные аппараты систем теплоснабжения . . . . .	36
2-2. Теплообменные аппараты систем регенеративного подогрева питательной воды . . . . .	45
2-3. Масло- и воздухоохладители . . . . .	63
2-4. Конденсаторы . . . . .	75
<b>Глава третья. Теплообменные аппараты химической промышленности . . . . .</b>	<b>82</b>
3-1. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты . . . . .	82
3-2. Теплообменные аппараты типа „труба в трубе“ . . . . .	108
3-3. Спиральные теплообменные аппараты . . . . .	112
3-4. Змеевиковые теплообменные аппараты . . . . .	113
3-5. Теплообменные аппараты специального назначения . . . . .	118
3-6. Выпарные аппараты . . . . .	135
3-7. Барометрические конденсаторы . . . . .	147
3-8. Колонные аппараты из стали и чугуна . . . . .	150
<b>Глава четвертая. Теплообменные аппараты промышленных холодильных установок и установок разделения воздуха методом глубокого охлаждения . . . . .</b>	<b>167</b>
4-1. Испарители, конденсаторы и вспомогательное оборудование аммиачных холодильных установок . . . . .	167

---

4-2. Испарители и конденсаторы фреоновых холодильных установок . . . . .	174
4-3. Пароводяные эжекторные холодильные машины . . . . .	175
4-4. Теплообменные аппараты установок разделения воздуха методом глубокого охлаждения . . . . .	177
<b>Глава пятая. Теплообменные аппараты нефтяной промышленности . . . . .</b>	<b>187</b>
5-1. Теплообменные аппараты с плавающей головкой . . . . .	187
5-2. Теплообменные аппараты с U-образным трубным пучком . . . . .	192
5-3. Теплообменные аппараты с паровым пространством . . . . .	195
5-4. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с неподвижными трубными решетками . . . . .	208
5-5. Теплообменные аппараты типа „труба в трубе“ . . . . .	212
5-6. Конденсаторы-холодильники . . . . .	219
<b>Глава шестая. Теплообменные аппараты металлургической промышленности и производства строительных материалов . . . . .</b>	<b>223</b>
6-1. Котлы-утилизаторы мартеновских и нагревательных печей . . . . .	223
6-2. Рекуператоры промышленных нагревательных печей . . . . .	227
6-3. Тепловое оборудование заводов строительных материалов . . . . .	229
<b>Глава седьмая. Вспомогательное оборудование теплообменных аппаратов . . . . .</b>	<b>229</b>
7-1. Насосы специального назначения . . . . .	229
7-2. Арматура и конденсатоотводчики . . . . .	232
Литература . . . . .	251
Предметный указатель . . . . .	253

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

### 1-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообменными аппаратами называют устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому для осуществления различных тепловых процессов, например, нагревания, охлаждения, кипения, конденсации или более сложных физико-химических процессов — выпарки, ректификации, абсорбции и т. п.

Все теплообменные аппараты по способу передачи тепла могут быть разделены на две большие группы: поверхностные аппараты и аппараты смешения. В поверхностных теплообменных аппаратах передача тепла от одного теплоносителя к другому осуществляется с участием твердой стенки. Процесс теплопередачи в смесительных теплообменных аппаратах осуществляется путем непосредственного контакта и смешения жидких и газообразных теплоносителей.

Поверхностные теплообменные аппараты в свою очередь подразделяют на рекуперативные и регенеративные. В рекуперативных аппаратах тепло от одного теплоносителя к другому передается через разделяющую их стенку из теплопроводного материала. В регенеративных теплообменных аппаратах теплоносители попеременно соприкасаются с одной и той же поверхностью нагрева, которая в первый период нагревается, аккумулируя тепло «горячего» теплоносителя, а во второй период охлаждается, отдавая тепло «холодному» теплоносителю.

Регенеративные теплообменные аппараты в большинстве случаев являются аппаратами периодического действия, а рекуперативные — чаще непрерывного действия.

Рекуперативные теплообменные аппараты могут быть классифицированы по следующим признакам.

I. По роду теплоносителей в зависимости от их агрегатного состояния:

- паро-жидкостные;
- жидкостно-жидкостные;
- газо-жидкостные;
- газо-газовые;
- паро-газовые.

II. По конфигурации поверхности теплообмена:

трубчатые аппараты с прямыми трубками;

спиральные;

пластинчатые;

змеевиковые;

ребристые.

III. По компоновке поверхности нагрева:

типа «труба в трубе»;

кожухо-трубчатые аппараты;

оросительные аппараты (не имеющие ограничивающего корпуса)

и т. д.

Теплообменные аппараты поверхностного типа, кроме того, могут быть классифицированы по назначению (подогреватели, холодильники и т. д.); по взаимному направлению потоков рабочих сред (прямоток, противоток, смешанный ток и т. д.); по материалу поверхности теплообмена; по числу ходов и т. д.

## 1-2. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

### 1. Виды расчетов

Существует два вида тепловых расчетов теплообменных аппаратов: конструкторский (проектный) расчет и поверочный расчет.

Конструкторский расчет производят при проектировании теплообменного аппарата, когда известны или заданы расходы теплоносителей и их параметры на входе и выходе из теплообменного аппарата. Целью конструкторского расчета является определение величины поверхности теплообмена выбранного типа теплообменного аппарата.

Поверочные тепловые расчеты выполняют для выявления возможности использования готовых или стандартных теплообменных аппаратов для тех или иных целей, определяемых технологическими требованиями.

### 2. Основные уравнения тепловых расчетов рекуперативных теплообменных аппаратов непрерывного и периодического действия

Конструкторский расчет теплообменного аппарата непрерывного действия основан на совместном решении уравнения теплового баланса и уравнения теплопередачи.

Уравнение теплового баланса в общем виде можно представить следующим образом:

$$Q = G_1 \Delta i_1 = G_2 \Delta i_2 + Q_{\text{п}}, \quad (1-1)$$

где  $Q$  — количество передаваемого тепла,  $\text{ккал/ч}$ ;

$G_1$  и  $G_2$  — расходы первичного и вторичного теплоносителей соответственно,  $\text{кг/ч}$ ;

$\Delta i_1$  и  $\Delta i_2$  — изменения энтальпий (теплосодержаний) теплоносителей,  $\text{ккал/кг}$ ;

$Q_{\text{п}}$  — тепловые потери,  $\text{ккал/ч}$ .



Если тепловые потери в окружающую среду  $Q_{\text{п}}$  выразить в долях от количества тепла, полученного вторичным теплоносителем, то уравнение (1-1) примет вид:

$$Q = G_1 \Delta i_1 = \eta_{\text{п}} G_2 \Delta i_2 \text{ [ккал/ч]}, \quad (1-2)$$

где  $\eta_{\text{п}}$  — коэффициент тепловых потерь, определяемый опытным путем.

Уравнению (1-2) можно придать различную форму в зависимости от конкретных условий протекания процесса.

При отсутствии изменения агрегатного состояния теплоносителя в теплообменнике

$$\Delta i = c_p (t'' - t') \text{ [ккал/кг]}, \quad (1-3)$$

где  $t'$  и  $t''$  — начальная и конечная температуры рабочей среды соответственно, °С;

$c_p$  — средняя теплоемкость теплоносителя в интервале температур  $t'' - t'$ , ккал/кг·град.

При изменении агрегатного состояния теплоносителя, например, в результате конденсации

$$\Delta i = c_{\text{рп}} (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}) + r + c_{\text{ж}} (t_{\text{н}} - t_{\text{ж}}) \text{ [ккал/кг]}, \quad (1-4)$$

где  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{ж}}$  — температуры поступающего в теплообменный аппарат пара и уходящего конденсата, °С;

$t_{\text{н}}$  — температура насыщения, °С;

$c_{\text{рп}}$  и  $c_{\text{ж}}$  — средние теплоемкости перегретого пара и конденсата, ккал/кг·град;

$r$  — скрытая теплота парообразования, ккал/кг.

Расходы теплоносителей при теплообмене без изменения агрегатного состояния теплоносителей определяют на основании уравнения (1-2) по формулам

$$G_1 = \frac{G_2 c_2 (t_2'' - t_2') \eta_{\text{п}}}{c_1 (t_1' - t_1'')} ; \quad (1-5)$$

$$G_2 = \frac{G_1 c_1 (t_1' - t_1'')}{c_2 (t_2'' - t_2') \eta_{\text{п}}} . \quad (1-6)$$

где  $G_2 c_2 = W_2$  и  $G_1 c_1 = W_1$  — водяные эквиваленты теплоносителей, отношение которых при  $\eta_{\text{п}} = 1$  обратно пропорционально изменению

температур однофазных рабочих сред, т. е.  $\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''}$ .

Расход первичного теплоносителя для теплообмена при конденсации первичного теплоносителя и неизменном агрегатном состоянии вторичного теплоносителя определяют по формуле

$$D_1 = \frac{G_2 c_2 (t_2'' - t_2') \eta_{\text{п}}}{i_{1\text{п}} - c_{1\text{к}} t_{\text{к}}} \text{ [кг/ч]}, \quad (1-7)$$

а при конденсации первичного теплоносителя и испарении вторичного расход первичного теплоносителя определяют по формуле

$$D_1 = \frac{D_2(i_{2п} - c_{ж}t_{ж})\eta_{п}}{i_{1п} - c_{к}t_{к}}, \quad (1-8)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — расходы первичного и вторичного пара,  $кг/ч$ ;  
 $i_{1п}$  и  $i_{2п}$  — энтальпия первичного и вторичного пара,  $ккал/кг \cdot град$ ;  
 $t_{к}$  — температура конденсата первичного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата,  $^{\circ}C$ ;  
 $t_{ж}$  — температура жидкого вторичного теплоносителя на входе в теплообменный аппарат,  $^{\circ}C$ ;  
 $c_{к}$  — теплоемкость конденсата первичного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата,  $ккал/кг \cdot град$ ;  
 $c_{ж}$  — теплоемкость жидкого вторичного теплоносителя на входе в теплообменный аппарат,  $ккал/кг \cdot град$ .

Уравнение теплопередачи в общем виде можно представить следующим образом:

$$Q = kF\Delta t_{ср}, \quad (1-9)$$

где  $Q$  — количество тепла, передаваемое в течение часа,  $ккал/ч$ ;  
 $k$  — коэффициент теплопередачи,  $ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$ ;  
 $F$  — расчетная поверхность теплообмена,  $м^2$ ;  
 $\Delta t_{ср}$  — средний температурный напор,  $^{\circ}C$ .

Расчетная поверхность теплообмена определяется как

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{ср}}, \quad (1-10)$$

где  $Q$  известно из уравнения (1-2). Методики определения величин  $k$  и  $\Delta t_{ср}$  приводятся ниже (см. стр. 15).

При поверочном расчете теплообменного аппарата непрерывного действия чаще всего бывает необходимо определить конечные температуры теплоносителей  $t_1''$  и  $t_2''$  и количество переданного тепла  $Q$ . В этом случае обычно бывают известны начальные температуры теплоносителей  $t_1'$  и  $t_2'$ , величина поверхности нагрева  $F$ , расходы теплоносителей  $G_1$  и  $G_2$ , примерные значения их средних теплоемкостей  $c_{1m}$  и  $c_{2m}$  и ориентировочное значение коэффициента теплопередачи  $k$ .

Вид расчетных формул зависит от схемы движения теплоносителей, а также от характера процесса теплообмена (с изменением или без изменения агрегатного состояния теплоносителей).

При теплопередаче без изменения агрегатного состояния теплоносителей в случаях прямотока (в теплообменном аппарате горячий и холодный теплоносители протекают параллельно и в одном направлении) температуру теплоносителей на выходе из аппарата можно определить по формулам

$$t_1'' = t_1' - (t_1' - t_2') \Pi; \quad (1-11)$$

$$t_2'' = t_2' + (t_1' - t_2') \Pi \frac{W_1}{W_2}. \quad (1-12)$$



Приведенные формулы применимы лишь к двум наиболее простым схемам движения теплоносителей (прямоток и противоток), причем для случаев, когда можно принять независимость водяных эквивалентов теплоносителей от температуры. Точно определить значение коэффициента теплопередачи, не зная конечных температур теплоносителей нельзя. Поэтому часто использование формул (1-11)—(1-14) не дает достаточно точных результатов. Для получения точных результатов поверочный расчет необходимо вести по методу последовательных приближений. По этому методу задаются значениями конечных температур и производят конструктивный расчет — определяют поверхность теплообмена. Правильно выбранными конечными температурами считают такие их значения, расчет по которым дает расчетную поверхность теплообмена, совпадающую с действительной поверхностью.

При теплопередаче с конденсацией пара первичного теплоносителя расчет температуры вторичного теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата производится по формуле

$$t_2'' = t_n - (t_n - t_2') e^{-\frac{kF}{W_2}}; \quad (1-15)$$

при кипении жидкости

$$t_1'' = t_n + (t_1' - t_n) e^{-\frac{kF}{W_1}}, \quad (1-16)$$

где  $t_1'$  и  $t_2'$  — начальные температуры теплоносителей, не изменяющих агрегатного состояния, °С;

$t_n$  — температура насыщения, °С;

$k$  — коэффициент теплопередачи,  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ .

$W_1$  и  $W_2$  — водяные эквиваленты теплоносителей, не изменяющих агрегатного состояния,  $\text{ккал}/\text{ч} \cdot \text{град}$ ;

$F$  — поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ .

Тепловой расчет теплообменных аппаратов периодического действия.

Если температура одного теплоносителя не изменяется (например, нагревание продукта за счет тепла конденсирующегося пара), то расчет производится по следующим формулам:

$$Q = G_2 c_{2m} (t_2'' - t_2') \eta_{\text{п}} = D (i - i_n) \tau \quad [\text{ккал}]; \quad (1-17)$$

$$Q = kF \Delta t_{\text{ср}} \tau \quad [\text{ккал}], \quad (1-18)$$

где  $G_2$  — количество продукта в аппарате,  $\text{кг}$ ;

$t_2'$  и  $t_2''$  — начальная и конечная температуры продукта, °С;

$c_{2m}$  — средняя теплоемкость продукта,  $\text{ккал}/\text{кг} \cdot \text{град}$ ;

$D$  — часовой расход греющего пара,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

$i$  и  $i_n$  — начальная и конечная энтальпия греющего пара,  $\text{ккал}/\text{кг}$ ;

$\tau$  — продолжительность процесса теплообмена, ч.

Поверхность теплообмена при конструкторском расчете может быть определена по формуле

$$F = \frac{G_2 c_{2m}}{k \tau} \ln \frac{t_n - t_2'}{t_n - t_2''} \quad [\text{м}^2], \quad (1-19)$$

где  $t_n$  — температура насыщения греющего пара, °С,

Конечная температура продукта при поверочном расчете

$$t_2'' = t_H - (t_H - t_2') e^{-\frac{kF\tau}{G_2 c_2 m}}. \quad (1-20)$$

Средняя температура нагреваемого продукта

$$t_2^{cp} = t_H - \frac{t_2'' - t_2'}{\ln \frac{t_H - t_2'}{t_H - t_2''}}. \quad (1-21)$$

Расход греющего пара

$$D = kF \frac{t_H - t_2'}{i_H - t_H} e^{-\frac{kF\tau}{G_1 c_1}}. \quad (1-22)$$

При одновременном изменении температур обоих теплоносителей во времени, а одного из них — и вдоль поверхности нагрева расчет гораздо сложнее и в предположении постоянства во времени расхода охлаждающего теплоносителя при введении в расчет средних значений (по времени и вдоль поверхности теплообмена) коэффициента теплопередачи проводится на основании следующих зависимостей [Л. 18]. Уравнение теплового баланса

$$Q = G_1 c_1 (t_1' - t_1'') \eta_{\text{п}} = W \Delta \vartheta_{cp} \tau \text{ [ккал]}. \quad (1-23)$$

Уравнение теплообмена

$$Q = kF \Delta t_{cp} \tau \text{ [ккал]}. \quad (1-24)$$

где

$G_1$  — вес охлаждаемой среды, кг

$W$  — водяной эквивалент охлаждающей среды, ккал/ч·град;

$\Delta \vartheta_{cp} = t_2'' - t_2'$  — среднее изменение температуры охлаждающей среды в процессе, °С.

Для времени  $d\tau$

$$dQ = W \Delta \vartheta d\tau = kF \Delta t d\tau, \quad (1-24a)$$

откуда

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} = \frac{kF}{W} = x. \quad (1-25)$$

Величина  $x$  для данного случая постоянна согласно принятым ранее допущениям о постоянстве коэффициента теплопередачи и расхода охлаждающего теплоносителя.

Вводится понятие характеристики теплообменного аппарата

$$y = \frac{e^x - 1}{e^x} = \frac{\Delta \vartheta_{cp}}{t_1 - t_2'}, \quad (1-26)$$

значение которой может быть также выражено соотношением

$$y = \frac{\Delta \vartheta_{cp}}{t_1' - t_1''} 2,3 \lg \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2'}. \quad (1-27)$$

При конструкторском расчете аппарата обычно задается величина среднего нагрева охлаждающего теплоносителя  $\Delta\vartheta_{\text{ср}}$ , а также значения  $t'_1$ ,  $t''_1$ ,  $t'_2$ , кроме того, известны бывают значения  $G_1c_1$  и  $\tau$ .

В этом случае определение величины  $F$  производится в следующем порядке: по уравнению (1-27) определяется величина  $y$ , затем по уравнению теплового баланса (1-23) определяют значения  $Q$  и  $W$ .

Конечная температура охлаждающей воды в начале процесса

$$t''_{2\text{нач}} = t'_2 + t'_w = t'_2 + (t'_1 - t'_2)y, \quad (1-28)$$

где

$$t'_w = (t'_1 - t'_2)y \quad (1-29)$$

и в конце процесса

$$t''_{2\text{кон}} = t'_2 + t''_w, \quad (1-30)$$

где

$$t''_w = (t''_1 - t'_2)y. \quad (1-31)$$

Средняя разность температур

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta\vartheta_{\text{ср}}}{x}, \quad (1-32)$$

где

$$x = 2,3 \lg \frac{1}{1-y}. \quad (1-33)$$

Поверхность теплообмена определяют, исходя из уравнения теплообмена (1-24).

При выполнении поверочных расчетов величина  $x = kF/W$  бывает обычно известна, что позволяет сразу же найти  $y$ , и по формулам, приведенным выше, все интересующие значения температур.

Определение коэффициента теплопередачи, знание которого позволяет затем определить поверхность нагрева в соответствии с основной расчетной формулой (1-9), является важнейшим элементом теплового расчета любого теплообменного аппарата.

Коэффициент теплопередачи для плоской стенки может быть найден по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{\text{заг}}} \quad [\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}]. \quad (1-34)$$

Для цилиндрической стенки

$$k = \frac{1}{d_{\text{ср}} \left( \frac{1}{\alpha_1 d_{\text{вн}}} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{нар}}} \right) + R_{\text{заг}}} \quad [\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}], \quad (1-35)$$