ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 110 1962

К РАСЧЕТУ СЛОЖНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Г. И. ФУКС

1

Будем называть сложным теплообменником систему, которая составлена из произвольного числа простых теплообменников. Отдельные теплообменники или части системы могут быть разного типа. Возможно последовательное и параллельное соединение частей системы. При последовательном соединении общее направление теплообменивающей жидкости может происходить параллельным потоком или в противоток. При параллельном соединении одна из теплообменивающихся жидкостей проходит через отдельные теплообменники последовательно, а другая — разветвляется между ними на параллельные потоки. Коэффициент теплопередачи и теплоемкости жидкостей для отдельных теплообменников системы могут быть различными.

Расчет сложных теплообменников, как прямой, так и поверочный, обычно связан с громоздкими вычислениями. Можно упростить эти расчеты, если заменить сложный теплообменник эквивалентным. Эквивалентный теплообменник системы должен дать тот же тепловой эффект, что и система, т. е. ту же передачу тепла, и иметь ту же величину поверхности нагрева. Ниже рассматриваются методы подбора эквивалентного теплообменника системы.

2

Схема системы последовательных теплообменников с общим параллельным течением теплообменивающихся жидкостей дана на рис. 1. Отдельные теплообменники a, b, c могут быть любого типа. Для каждого из теплообменников известна зависимость $p=f(\varphi, R)$ [1]. Критерий охлаждения горячей жидкости для всей системы

$$p=\frac{t'_1-t''_1}{t'_1-t'_2}. \qquad (a)$$

Для отдельных теплообменников a, b, c... коэффициенты теплопередачи, водяные эквиваленты и поверхности соответственно равны κ_a, κ_b....W_{1a}, W_{2a}...F_a, F_b... Тогда для теплообменников a и b

$$\varphi_a=\frac{\kappa_a F_a}{W_{1a}}, \qquad (b)$$

$$R_a = \frac{W_{1a}}{W_{2a}} = \frac{t_{2ab} - t_2'}{t_1' - t_{1ab}}, \tag{c}$$

$$p_a = \frac{t_1' - t_{1ab}}{t_1' - t_2'}, \tag{d}$$

$$R_b = \frac{W_{1b}}{W_{2b}} = \frac{t_{2bc} - t_{2ab}}{t_{1ab} - t_{1bc}}, \tag{c'}$$

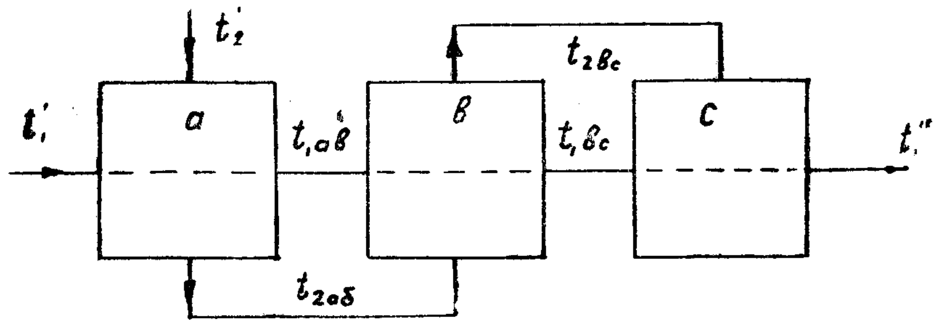

Рис. 1.

$$p_b = \frac{t_{1ab} - t_{1bc}}{t_{1ab} - t_{2ab}}, \tag{d'}$$

$$\varphi_b = \frac{\kappa_b F_b}{W_{1b}}. \tag{b}$$

Для теплообменника b из (d'), (d) и (c) имеем

$$p_b = \frac{\dfrac{t_1' - t_{1bc}}{t_1' - t_2'} - p_a}{1 - p_a - p_a R_a}. \tag{e}$$

Если сложный теплообменник состоит из двух: a и b, то $t_{1abc} = t_1''$ и дробь в числителе правой части (e) равна p. Поэтому

$$p_{(2)} = p_a + p_b - p_a(1 + R_a). \tag{1}$$

Аналогичный расчет дает для теплообменника из трех частей (рис. 1):

$$p_{(3)} = (p_a + p_b + p_c) - [p_a(1 + R_a)p_b + p_a(1 + R_a)p_c + p_b(1 + R_b)p_c] +$$
$$+ p_a(1 + R_a)p_b(1 + R_b)p_c. \tag{2}$$

Вообще для последовательной системы, составленной из n простых теплообменников, при общем параллельном токе, имеем

$$p_{(n)} = (p_a + p_b + \ldots + p_n) - [p_a(1 + R_a)p_b + p_a(1 + R_a)p_c + \ldots +$$
$$+ p_{n-1}(1 + R_{n-1})p_n] + [p_a(1 + R_a)p_b(1 + R_b)p_c + p_a(1 + R_a).$$

$$p_b(1+R_b)p_c + \dots + p_{n-2}(1+R_{n-2})p_{n-1}(1+R_{n-1})p_n] -$$

$$-[p_a(1+R_a)p_b(1+R_b)p_c(1+R_c)p_d + \dots + p_{n-3}(1+$$

$$+R_{n-3})p_{n-2}(1+R_{n-2})p_{n-1}(1+R_{n-1})p_n] + \dots +$$

$$+(-1)^{n-1}p_a(1+R_a)p_b(1+R_b)\dots p_{n-1}(1+R_{n-1})p_n. \qquad (3)$$

Построение соотношения (3) ясно. В первых скобках стоит сумма значений p_a, $p_b \dots$ для всех теплообменников. Число членов в этой скобке равно $C_n^1 = n$. Число членов 2-й скобки равно C_n^2 и т. д. Соотношения (1) и (2) могут быть получены как частные случаи при $n = 2$ и $n = 3$ соответственно.

Если принять, что водяные эквиваленты отдельных теплообменников одинаковы, т. е.

$$W_{1a} = W_{1b} = \dots = W_1,$$

$$W_{2a} = W_{2b} = \dots = W_2,$$

то $$R_a = R_b = \dots = R,$$

где W_1, W_2 и R — соответственные значениям для всего теплообменника. Тогда

$$p_{(n)} = \Sigma[p - (1+R)\, p\cdot p + (1+R)^2 p\cdot p\cdot p -$$

$$-(1+R)^3 p\cdot p\cdot p + \dots + (-1)^{n-1}(1+R)^{n-1} p\cdot p\dots p\cdot p]. \qquad (4)$$

Здесь $\Sigma p = p_a + p_b + \dots + p_n$; $\quad \Sigma p\cdot p = p_a p_b + p_a p_c + \dots$

Число таких членов будет равно C_n^1, C_n^2 и т. д. В последнем члене стоит произведение $p_a p_b \dots p_n$.

Критерии охлаждения горячей жидкости p и нагрева холодной жидкости p' связаны между собою соотношением $p = p'R'$, где $R' = \dfrac{1}{R}$ [1].

Поэтому имеем также

$$p'_{(n)} = \Sigma[p' - (1+R')p'\cdot p' + (1+R')^2 p'\cdot p'\cdot p' - (1+$$

$$+R')^3 p'\cdot p'\cdot p'\cdot p' + \dots + (-1)^{n-1}(1+R')^{n-1}\cdot p'\cdot p'\dots p'\cdot p']. \qquad (5)$$

Из (4) и (5) видно, что результат работы системы теплообменников, т. е. относительное охлаждение горячей жидкости или относительный нагрев холодной жидкости не изменяются, если отдельные теплообменники переставить местами. При этом должно быть сохранено общее движение жидкости в системе параллельным потоком. Для расчета промежуточных температур каждый из теплообменников должен быть поставлен „на свое место" в схеме. Разумеется, эти следствия верны лишь при условии неизменных или мало изменяющихся теплоемкостей теплообменивающихся жидкостей.

Если система составлена из отдельных теплообменников, одинаковых по характеру с одинаковыми значениями критерия поверхности нагрева $\varphi_a = \varphi_b = \dots$, то

$$p_a = p_b = \dots = p_i,$$

$$p'_a = p'_b = \dots = p'_i.$$

Для всей системы:

$$p_{(n)} = n p_i - C_n^2 (1+R) p_i^2 + C_n^3 (1+R)^2 p_i^3 -$$
$$- C_n^4 (1+R)^3 p_i^4 + \ldots + (-1)^{n-1} (1+R)^{n-1} p_i^n; \qquad (6)$$

$$p'_{(n)} = n p_i' - C_n^2 (1+R') p_i'^2 + C_n^3 (1+R')^2 p_i'^3 - C_n^4 (1+$$
$$+ R')^3 p_i'^4 + \ldots + (-1)^{n-1} (1+R')^{n-1} p_i'^n. \qquad (7)$$

Путем несложных преобразований из (6) и (7) можно получить

$$p_{(n)} = \frac{1 - [1 - p_i(1+R)]^n}{1+R}, \qquad (8)$$

$$p_i = \frac{1 - \sqrt[n]{1 - p_{(n)}(1+R)}}{1+R}, \qquad (9)$$

$$p'_{(n)} = \frac{1 - [1 - p_i'(1+R')]^n}{1+R'}, \qquad (8')$$

$$p_i' = \frac{1 - \sqrt[n]{1 - p'_{(n)}(1+R')}}{1+R'}. \qquad (9')$$

При этом поверхности нагрева отдельных теплообменников связаны зависимостью

$$\kappa_a F_a = \kappa_b F_b = \ldots = \kappa_i F_i.$$

Если коэффициенты теплопередачи одинаковы, то равны и поверхности нагрева отдельных теплообменников.

3

Схема системы, состоящая из двух простых теплообменников при общем противотоке, приведена на рис. 2. Теплообменники a и b могут быть произвольного типа. Для всего теплообменника:

$$p' = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}. \qquad (a)$$

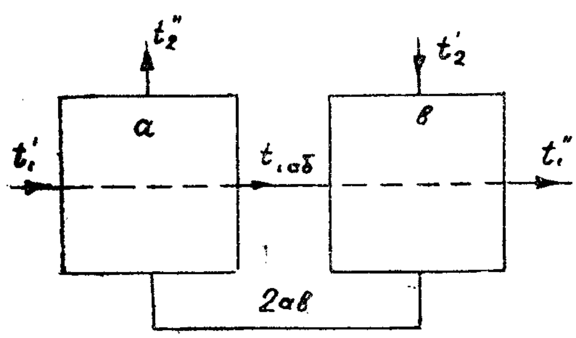

Рис. 2.

Для теплообменника a коэффициент теплопередачи, поверхности нагрева и водяные эквиваленты соответственно равны κ_a, F_a, W_{1a} и

W_{2a}, т. е. $R_a' = \frac{W_{1a}}{W_{2a}}$ и $\varphi_a' = \frac{\kappa_a F_a}{W_{2a}}$ [1]. Температура горячей жидкости на выходе равна t_{1ab}, а нагреваемой жидкости на входе — t_{2ab}. Тогда по [1]

$$t_2'' - t_{2ab} = \frac{p_a'}{1-p_a'}\,(t_1' - t_2''), \tag{b}$$

$$t_1' - t_{1ab} = \frac{p_a' R_a'}{1-p_a'}\,(t_1' - t_2''). \tag{c}$$

Для теплообменника b:

$$p_b' = \frac{t_{2ab} - t_2'}{t_{1ab} - t_2'} = \frac{(t_2'' - t_2') - (t_2'' - t_{2ab})}{(t_1' - t_2') - (t_1' - t_{1ab})}.$$

С учетом (a), (b) и (c) это дает

$$p_{(2)}' = \frac{p_a' + p_b' - p_a'(1 + R_a')\,p_b'}{1 - R_a'\,p_a'\,p_b'}. \tag{10}$$

Для системы, составленной из трех простых теплообменников a, b, c, аналогичный расчет дает

$$p_{(3)}' = \frac{(p_a' + p_b' + p_c') - [p_a'(1 + R_a')\,p_b' + p_a'(1 + R_a')\,p_c' + p_b'(1 + R_b')\,p_c'] + p_a' p_b' p_c'(1 + R_a' + R_a' R_b')}{1 - [p_a' R_a' p_b' + p_a' R_a' p_c' + p_b' R_b' p_c'] + p_a' p_b' p_c' R_a'(1 + R_b')}. \tag{11}$$

Для системы из n простых теплообменников при общем противотоке теплообменивающихся жидкостей получается

$$p_{(n)}' = \frac{A}{B}, \tag{12}$$

где

$$\begin{aligned} A = {} & (p_a' + p_b' + \ldots + p_n') - [p_a'(1 + R_a')\,p_b' + p_a'(1 + \\ & + R_a')\,p_c' + \ldots + p_{n-1}'(1 + R_{n-1}')\,p_n'] + [p_a' p_b' p_c'(1 + \\ & + R_a' + R_a' R_b') + \ldots + p_{n-2}' p_{n-1}'(1 + R_{n-2}' + R_{n-2}' R_{n-1}')] - \\ & - [p_a' p_b' p_c' p_d'(1 + R_a' + R_a' R_b' + R_a' R_b' R_c') + \ldots \\ & \ldots + p_{n-3}' p_{n-2}' p_{n-1}' p_n'(1 + R_{n-3}' + R_{n-3}' R_{n-2}' + \\ & + R_{n-3}' R_{n-2}' R_{n-1}')] + \ldots + (-1)^{n-1}\, p_a' p_b' \ldots p_n'(1 + \\ & + R_a' + R_a' R_b' + \ldots + R_a' R_b' \ldots R_{n-1}'). \end{aligned} \tag{13}$$

$$B = 1 - [p'_a R'_a p'_b + p'_a R'_a p'_c + \ldots + p'_{n-1} R'_{n-1} p'_n] +$$

$$+ [p'_a p'_b p'_c R'_a (1 + R'_b) + \ldots + p'_{n-2} p'_{n-1} p'_n R'_{n-2} (1 +$$

$$+ R'_{n-1})] - [p'_a p'_b p'_c p'_d R'_a (1 + R'_b + R'_b R'_c) + \ldots + p'_{n-3} p'_{n-2}$$

$$p'_{n-1} p'_n R'_{n-3} (1 + R'_{n-2} + R'_{n-2} R'_{n-1})] + \ldots + (-1)^{n-1} p'_a p'_b p'_c \ldots$$

$$\ldots p'_n R'_a (1 + R'_b + R'_b R'_c + \ldots + R'_b R'_c \ldots R'_{n-1}). \qquad (14)$$

Число членов во втором слагаемом в числителе и знаменателе (12) равно C_n^2, в третьем — C_n^3 и т. д. Полученные ранее (10) и (11) являются частными случаями последнего при $n = 2$ и $n = 3$.

Если водяные эквиваленты всех отдельных теплообменников одинаковы, т. е.:

$$W_{1a} = W_{1b} = \ldots = W_1,$$

$$W_{2a} = W_{2b} = \ldots = W_2,$$

$$\text{то} \quad R'_a = R'_b = \ldots = R',$$

где W_1, W_2 и R' — соответственные величины для всего теплообменника. Тогда

$$p'_{(n)} = \frac{\Sigma [p' - (1 + R') p' \cdot p' + (1 + R' + R'^2) p' \cdot p' \cdot p' - (1 + R' + R'^2 + R'^3) p' \cdot p' \cdot p' \cdot p' + \ldots + (-1)^{n-1} (1 + R' + R'^2 + \ldots + R'^{n-1}) p' \cdot p' \ldots p']}{\Sigma [1 - R' p' \cdot p' + R' (1 + R') p' \cdot p' \cdot p' - R' (1 + R' + R'^2) p' \cdot p' \cdot p' \cdot p' + \ldots + (-1)^{n-1} R' (1 + R' + \ldots + R'^{n-2}) p' \cdot p' \ldots p']}. \qquad (15)$$

В этой формуле $\Sigma p' = p'_a + p'_b + \ldots + p'_n$,

$$\Sigma p' \cdot p' = p'_a p'_b + p'_a p'_c + \ldots + p'_{n-1} p'_n,$$

$$\Sigma p' \cdot p' \cdot p' = p'_a p'_b p'_c + p'_a p'_b p'_d + \ldots + p'_{n-2} p'_{n-1} p'_n \quad \text{и т. д.}$$

Можно также записать:

$$p_{(n)} = \frac{\Sigma [p - (1 + R) p \cdot p + (1 + R + R^2) p \cdot p \cdot p - (1 + R + R^2 + R^3) p \cdot p \cdot p \cdot p + \ldots + (-1)^{n-1} (1 + R + R^2 + \ldots + R^n) p \cdot p \ldots p]}{\Sigma [1 - R p \cdot p + R (1 + R) p \cdot p \cdot p - R (1 + R + R^2) p \cdot p \cdot p \cdot p + \ldots + (-1)^{n-1} R (1 + R + R^2 + \ldots R^{n-1}) p \cdot p \ldots p]}. \qquad (16)$$

Из (15) и (16) следует, что относительное охлаждение горячей жидкости и относительный нагрев холодной жидкости в системе не изменяются, если отдельные теплообменники переставить местами.

сохранив при этом общее направление противотока. Если отдельные теплообменники, входящие в систему, будут одного и того же типа и имеют одинаковые размеры и одинаковые коэффициенты теплопередачи, то $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \ldots = \frac{\varphi'}{n}$ и $p'_1 = p'_2 = \ldots = p'_n$.

Тогда соотношение (15) получает вид:

$$p'_{(n)} = \frac{n p'_i - (1+R') C_n^2 p_i'^2 + (1+R'+R'^2) C_n^3 p_i'^3 - (1+R'+R'^2+R'^3) C_n^4 p_i'^4 + \ldots + (-1)^{n-1} (1+R'+R'^2+\ldots+R'^{n-1}) C_n^n p_i'^n}{1 - R' C_n^2 p_i'^2 + R'(1+R') C_n^3 p_i'^3 - R'(1+R'+R'^2) C_n^4 p_i'^4 + \ldots + (-1)^{n-1} R'(1+R'+R'^2+\ldots+R'^{n-2}) C_n^n p_i'^n} . \quad (17)$$

Аналогичное соотношение можно записать для p_n. В более простой форме получается

$$p'_{(n)} = \frac{1 - \left(\frac{1-p'_i}{1-p'_i R'}\right)^n}{1 - R' \left(\frac{1-p'_i}{1-p'_i R'}\right)^n} , \quad (18)$$

и

$$p'_i = \frac{1 - \sqrt[n]{\frac{1-p'_{(n)}}{1-p'_{(n)} R'}}}{1 - R' \sqrt[n]{\frac{1-R'_{(n)}}{1-p'_{(n)} R'}}} . \quad (18')$$

Аналогичные соотношения для p_n и p_i имеют вид:

$$p_{(n)} = \frac{1 - \left(\frac{1-p_i}{1-p_i R}\right)^n}{1 - R\left(\frac{1-p_i}{1-p_i R}\right)^n} \quad (19)$$

и

$$p_i = \frac{1 - \sqrt[n]{\frac{1-P_{(n)}}{1-p_{(n)} R}}}{1 - R \sqrt[n]{\frac{1-p_{(n)}}{1-p_{(n)} R}}} . \quad (19')$$

4

Систему теплообменников, в которой одна из теплообменивающихся жидкостей разветвляется на параллельные потоки, будем называть параллельно-смешанной системой. Пусть параллельно-смешанная система состоит из частей a, b, c произвольного типа (рис. 3). Нагреваемая жидкость протекает через a, b и c последовательно, горячая жидкость разветвляется на 3 потока параллельно.

По соотношению [1]

$$1-p'=\frac{t'_1-t''_2}{t'_1-t'_2}$$

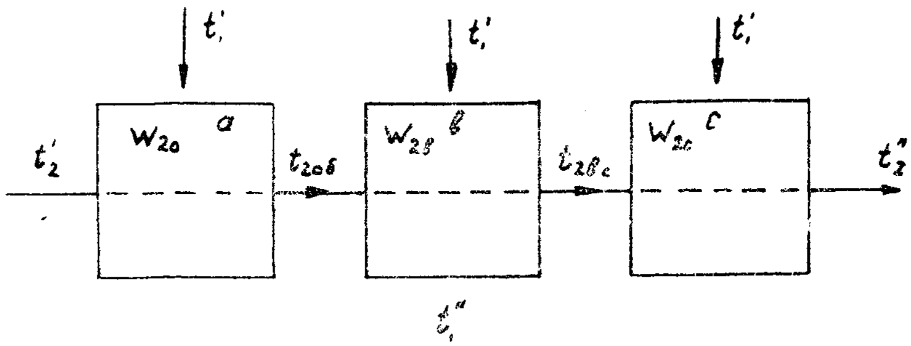

Рис. 3.

для частей a, b и c имеем:

$$1-p'_a=\frac{t'_1-t_{2ab}}{t'_1-t'_2}, \tag{a}$$

$$1-p'_b=\frac{t'_1-t_{2bc}}{t'_1-t_{2ab}}, \tag{b}$$

$$1-p'_c=\frac{t'_1-t''_2}{t'_1-t_{2bc}}; \tag{c}$$

для всего теплообменника:

$$1-p'=\frac{t'_1-t''_2}{t'_1-t'_2}. \tag{d}$$

Следовательно,

$$1-p'_{(3)}=(1-p'_a)(1-p'_b)(1-p'_c). \tag{20}$$

В общем случае системы из n частей:

$$1-p'_{(n)}=(1-p'_a)(1-p'_b)\dots(1-p'_n). \tag{21}$$

Для системы, в которой горячая жидкость протекает последовательно, а нагреваемая разветвляется на n потоков, аналогичный вывод дает

$$1-p_{(n)}=(1-p_a)(1-p_b)\dots(1-p_n). \tag{22}$$

Если отдельные части a, b... идентичны, разветвляющаяся жидкость делится на равные части и коэффициенты теплопередачи отдельных частей одинаковы, то соотношения (21) и (22) переходят в

$$1-p'_{(n)}=(1-p'_1)^n, \tag{23}$$

$$1-p_{(n)}=(1-p_1)^n. \tag{24}$$

При подсчете значений φ_a, φ_b и т. д. по p_a, $p_b \ldots$ надо учитывать действительное значение R_a, R_b, т. е. знать распределение разветвляющейся жидкости между отдельными теплообменниками.

5

Полученные соотношения дают возможность провести расчет некоторых сложных теплообменников. Перекрестно-точный теплообменник с 3 пересечениями, схема которого изображена на рис. 4, можно рассматривать как систему из одинаковых частей a, b и c, включенных в противоток. Примем, что коэффициенты теплопередачи, водяные эквиваленты и поверхности нагрева всех частей одинаковы, т. е.

$$W_{1a} = W_{1b} = W_{1c} = W_1,$$

$$W_{2a} = W_{2b} = W_{2c} = W_2.$$

Это означает, что

$$R_a = R_b = R_c = R,$$

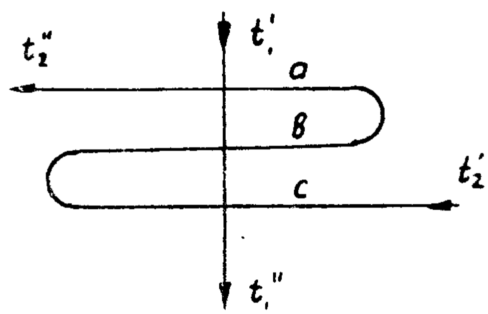

Рис. 4.

где W_1, W_2 и R — соответственные значения для всего теплообменника. При этом условии

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \frac{\varphi}{3} = \frac{\kappa F}{3W_1} = \varphi_i,$$

$$p_a = p_b = p_c = p_i.$$

При поверочном расчете можно считать известными величины φ_i и R. В данном случае части a, b и c представляют собой перекрестноточные теплообменники с перемешиванием одной или обеих теплообменивающихся жидкостей. По соответственному соотношению или графику для этого теплообменника [1] находят значение p_i. Относительная величина охлаждения горячей жидкости определяется по (19). Две из 4 температур: t'_1, t''_1, t'_2 и t''_2 должны быть заданы. Используя связи из [1], определяют остальные температуры.

При прямом расчете можно считать известными $R = \frac{W_1}{W_2}$ и $p_3 = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2}$. Величина p_i определяется из (19). По p_i и R находится φ_i, а затем $F_i = \frac{\varphi_i W_1}{\kappa}$ и $F = 3F_i$. В дальнейшем можно уточнить расчеты, учитывая изменение теплоемкости и коэффициентов теплопередачи в отдельных частях. Этот вопрос рассматривается особо.

При расчете сложного теплообменника, схема которого приведена на рис. 5, можно привести его к эквивалентному теплообменнику с той же передачей тепла. Для этого „выпрямим" его схему по направлению течения горячей жидкости (рис. 6). Из рисунка видно, что части b, c и d составляют противоточную систему. Если принять теплоемкость и коэффициент теплопередачи неизменными, то по (19)

$$p_{bcd} = \frac{1 - \left(\frac{1-p_i}{1-p_i R}\right)^3}{1 - R\left(\frac{1-p_i}{1-p_i R}\right)^3}. \qquad (a)$$

Таким образом, система теплообменников b, c, d приводится к эквивалентному теплообменнику bcd с поверхностью нагрева $3F_i$. Аналогично части e и f составляют прямоточную систему, для которой по (8)

$$p_{ef} = \frac{1-[1-p_i(1+R)]^2}{1+R} \qquad (b)$$

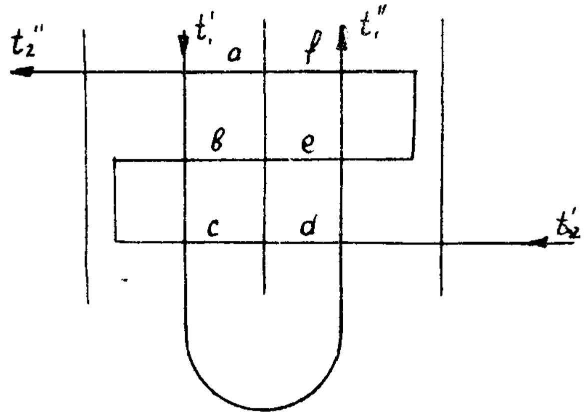

Рис. 5

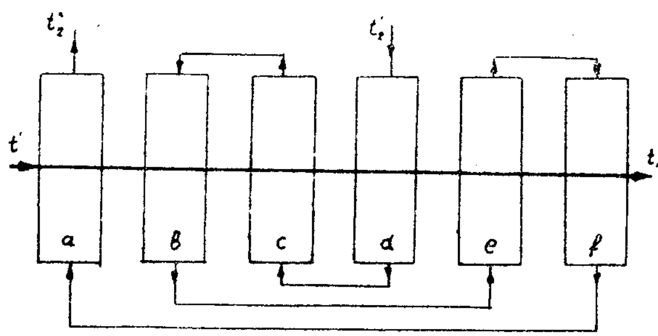

Рис. 6.

и поверхность нагрева равна $2F_i$.

В целом рассматриваемый теплообменник сводится к системе из трех частей по схеме, данной на рис. 7. Так как части bcd и ef включены параллельным потоком, то по (4)

$$p_{bcdef} = p_{bcd} + p_{ef} - (1+R)\, p_{bcd}\, p_{ef}. \qquad (c)$$

Этим производится замена частей bcd и ef эквивалентным теплообменником $bcdef$ с поверхностью нагрева $5F_i$ (рис. 8). Весь рассчитываемый теплообменник можно рассматривать как состоящий из двух частей a и $bcdef$, включенных в противоток. Поэтому

$$p = \frac{p_a + p_{bcdef} - (1+R)\, p_a\, p_{bcdef}}{1 - R\, p_a\, p_{bcdef}}. \qquad (d)$$

При поверочном расчете известными являются $\varphi_i = \frac{\kappa F_i}{W_1}$ и $R = \frac{W_1}{W_2}$, по которым определяется p_i. По (*a*), (*b*), (*c*) и (*d*) последовательно определяются p_{bcd}, p_{ef}, p_{bcdef} и p для всего теплообменника. Если, кроме того, известны t'_1 и t'_2, то из $p = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2}$ и $R = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t''_1}$ определяются t''_1 и t''_2. Затем можно определить промежуточные температуры горячей и холодной жидкостей между отдельными частями и уточнить расчет, как показано ниже.

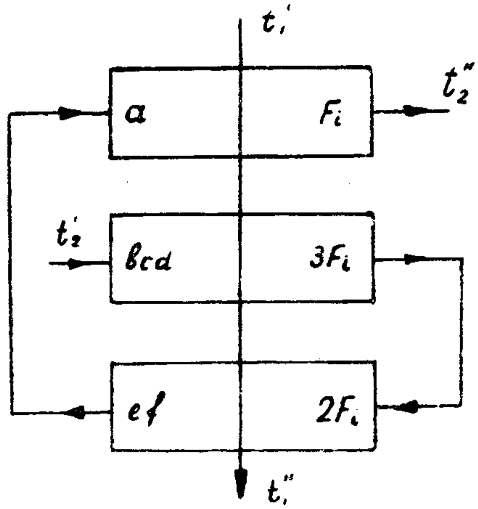

Рис. 7.

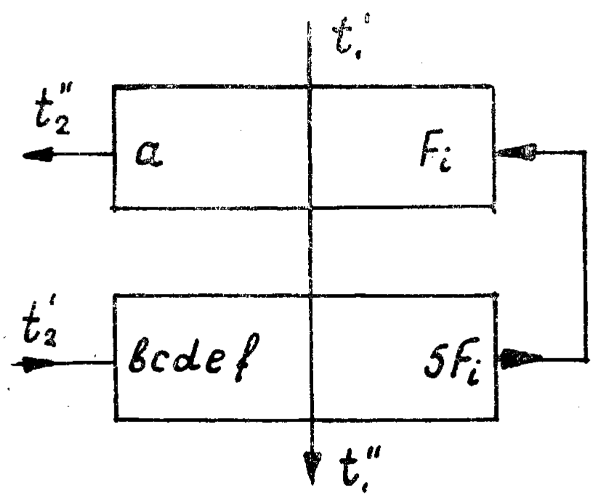

Рис. 8.

При прямом расчете заданными являются значения коэффициента теплопередачи κ_1, W_1 и W_2, т. е. $R = \frac{W_1}{W_2}$, а также значение

$$p_\partial = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2}.$$

Принципиально возможно, последовательно используя (*a*), (*b*) и (*c*), получить из (*d*) уравнение, в котором единственной неизвестной величиной будет p_i. По этой величине и R можно найти значения φ_i, как это указано в [1], а затем $F_i = \frac{\varphi_i W_1}{\kappa}$ и $F = 6F_i$. Но при этом получится сложное уравнение, которое можно решать лишь подбором.

Более целесообразным является путь прямого подбора. Задают несколько значений φ_i и определяют соответственные значения p_i.

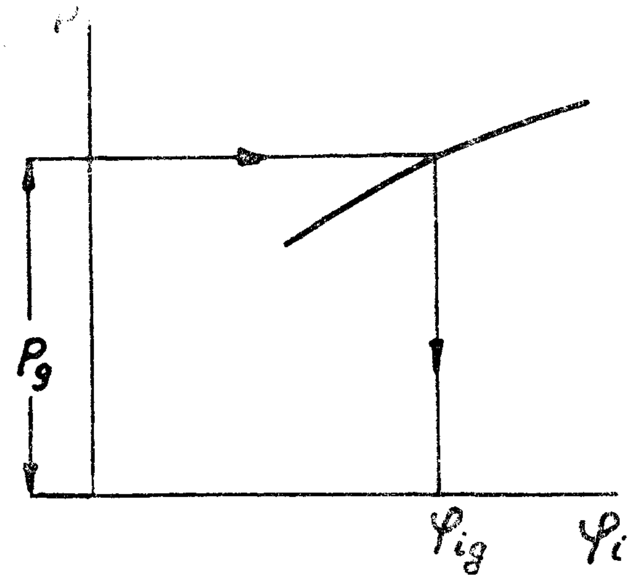

Рис. 9.

Затем по (*a*), (*b*), (*c*) и (*d*) находят соответственные значения p. Построив график $p = f(\varphi_i)$ (рис. 9), находят по p_∂ величину $\varphi_{i\partial}$, а по ней $F_{i\partial} = \frac{\varphi_{i\partial} W_1}{\kappa}$ и $F = 6F_i$.

6

Поверочный расчет системы, состоящей из произвольного числа теплообменников разных типов, обычно ставит своей целью подсчет выходных температур t''_1 и t''_2 при известных температурах входа t'_1 и t'_2. Если теплоемкости теплообменивающихся жидкостей постоянны, то значения водяных эквивалентов W_1 и W_2 и их отношение $R = \frac{W_1}{W_2}$ будут одинаковыми для всей системы и отдельных теплообменников. Пусть коэффициенты теплопередачи теплообменников системы будут κ_a, κ_b ... Для каждого теплообменника можно определить $\varphi_a = \frac{\kappa_a F_a}{W_1}$, $\varphi_b = \frac{\kappa_b F_b}{W_1}$. Зная R, можно, пользуясь уравнениями $p = f(\varphi_i R)$ или соответственными графиками, вычислить значение p_a, p_b .... В зависимости от схемы включения отдельных теплообменников системы можно, используя (4), (16), (21) или (22), вычислить $p = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2}$, что вместе с $R = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t''_1}$ дает возможность определить t''_1 и t''_2.

Так как коэффициенты теплопередачи κ_a, κ_b... в действительности зависят от температур, то расчет можно уточнить. Значения p_a, p_b... позволяют подсчитать температуры на входе и выходе из каждого теплообменника и уточнить значения κ_a, κ_b... После этого расчет системы надо повторить.

При переменных теплоемкостях расчет проводится путем постепенного приближения. В качестве примера рассмотрим противоточную систему, данную на рис. 2. Для теплообменивающихся жидкостей известны зависимости $i_1 = f(t_1)$ и $i_2 = f(t_2)$. Предварительно надо задаться одной из выходных температур, например, t_1'' и найти соответственное значение $t_{2пр}$. Затем из уравнения теплового баланса:

$$G_1(i_1' - i_{1пр}'') = G_2(i_{2пр}'' - i_2') \tag{25}$$

определить $i_{2пр}''$, а по зависимости $i_2 = f(t_2)$—соответственное значение $t_{2пр}''$. Средние значения водяных эквивалентов будут

$$\overline{W}_1 = \frac{G_1(i_1' - i_{1пр}'')}{t_1' - t_2''}, \tag{26}$$

$$\overline{W}_2 = \frac{G_2(i_{2пр}'' - i_2')}{t_{2пр}'' - t_2'}. \tag{27}$$

По этим значениям находится

$$R_{пр}' = \frac{\overline{W}_2}{\overline{W}_1}. \tag{a}$$

Первый расчет проводится по $\overline{W}_{1пр}$, $\overline{W}_{2пр}$ и $R_{пр}'$, как указано выше. В итоге определяется значение $p_{пр}' = \dfrac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}$, по которому можно найти более точное значение t_2'' и повторить расчет до достаточного совпадения. Общее число пересчетов не будет значительным, ибо, как это очевидно из (26), (27) и (a), значения $\overline{W}_1$, $\overline{W}_2$ и R' будут мало меняться при пересчетах. Значения p_a', p_b' и t_2'' последнего расчета принимаются за начальные при дальнейшем уточнении.

Рассмотрим теперь теплообменник a (рис. 2). По соотношению $1 - p_a' = \dfrac{t_1' - t_2''}{t_1' - t_{2ab}}$ [1] определяется t_{2ab}, а затем i_{2ab}. Из уравнений теплового баланса теплообменника

$$G_1(i_1' - i_{1ab}) = G_2(i_2'' - i_{2ab}) \tag{25'}$$

находится i_{1ab}, а затем t_{1ab}. Тогда

$$W_{1a} = \frac{G_1(i_1' - i_{1ab})}{t_1' - t_{1ab}}, \tag{26'}$$

$$W_{2a} = \frac{G_2(i_2'' - i_{2ab})}{t_2'' - t_{2ab}}, \tag{27'}$$

$$R_a' = \frac{W_{2a}}{W_{1a}}, \tag{b}$$

$$\varphi'_a = \frac{k_a F_a}{W_{2a}}. \qquad (c)$$

По данным R'_a и φ'_a для теплообменника a определяется уточненное значение p'_a и расчет повторяется до совпадения. В результате этого расчета определяются t_{1ab} и t_{2ab} перед вторым теплообменником системы, для которого проводятся те же расчеты, и т. д.

В результате первых расчетов последнего теплообменника системы может оказаться, что значение t''_2 не будет равно действительному. Следовательно, не будет точно и значение t''_1. Но $p' = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t'_2}$ будет ближе к истинному, чем первоначально принятое его значение. Поэтому, приняв $p' = \frac{t'_1 - t''_2}{t'_1 - t'_2}$, можно из него найти более точное значение t''_2, по которому повторить расчет, пока 2 последовательных значения t'_2 не совпадут.

В этих расчетах предполагалось, что в пределах каждого теплообменника системы теплоемкости и коэффициенты теплопередачи остаются неизменными. Если температуры в теплообменнике изменяются значительно, то в некоторых случаях его можно разбить для расчета на отдельные части, т. е. рассматривать его как систему. Этот прием можно применить:

а) для прямоточного теплообменника, так как очевидно, что система, составленная из последовательно включенных прямоточных теплообменников при общем прямотоке, полностью эквивалентна прямоточному теплообмену с суммарной поверхностью нагрева;

б) для противоточного теплообменника;

в) для перекрестно-точного теплообменника с перемешиванием одной жидкости. Так, если перемешивается горячая жидкость, то эквивалентные системы будут состоять из нескольких теплообменников, включенных параллельно по нагреваемой жидкости и последовательно—по горячей;

г) для перекрестно-точного теплообменника с многократными пересечениями. Отдельные части его включаются в прямоток или противоток сообразно с общим направлением течения теплообменивающихся жидкостей;

д) для любого теплообменника при $R = 0$ (или $R' = 0$).

Действительно, при этом условии, как указывалось [1], зависимость $p = f(\varphi, R)$ для всех таких теплообменников одинакова. Следовательно, любой теплообменник при R или R', равном нулю, для расчета можно заменить эквивалентным прямоточным или противоточным с той же поверхностью нагрева.

7

При расчете поверхности нагрева системы должны быть заданы значения входной и выходной температур теплообменивающихся жидкостей, по которым определяется действительное значение $p_\partial = \frac{t'_1 - t''_1}{t'_1 - t'_2}$ (или p'_∂). Если, кроме того, задано распределение передаваемого тепла между теплообменниками системы, то из уравнений теплового баланса определяются температуры между теплообменниками. Поэтому можно сосчитать поверхность нагрева каждого теплообменника системы. Значения коэффициентов теплопередачи уточняются в процессе расчета, как указывалось при поверочном расчете.

~~Иногда при расчете~~ системы требуется выдержать определенное отношение поверхностей нагрева частей системы:

$$F_a : F_b : \ldots \quad m : n : \ldots \tag{a}$$

Если теплоемкости не изменяются, то водяные эквиваленты частей системы и всей системы также остаются постоянными, как и значение R (или R'). Задаются несколькими значениями F'_a, $F''_a \ldots$ и из (a) определяют соответственные значения F'_b, $F''_b \ldots$ и т. д. Для каждого задания проводится поверочный расчет, как указано выше, в результате которого определяется ряд значений p_1, $p_2 \ldots$ (или p'_1, $p'_2 \ldots$).

Построив график зависимости $p = f(F_a)$ находим по действительному значению p_∂ величину F_a (рис. 9), а затем из (a) F_b, $F_c \ldots$ При расчете могут быть уточнены значения коэффициентов теплопередачи, как указывалось выше.

При изменяющихся теплоемкостях прямой расчет возможен путем постепенного приближения. Предварительно расчет целесообразно произвести по средним значениям $\bar{W}_1$ и $\bar{W}_2$, которые определяются по (25), (26) и (27). Значения F_a, $F_b \ldots$, полученные при этом расчете, принимаются за исходные при дальнейшем уточнении, которые проводятся в виде поверочного расчета, последовательно рассматривая теплообменники a, $b \ldots$, как указывалось выше. В результате расчетов для каждого задаваемого значения F_a получается значение p. Построив график (рис. 9), определяют по p_∂ искомое значение F_a, а затем из (a)—значения F_b, $F_c \ldots$

ЛИТЕРАТУРА

1. Фукс Г. И. К расчету теплообменников. „Известия ТПИ“, том 109, 1960.