

## К РАСЧЕТУ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Г. И. ФУКС

1.

Для расчета теплообменников по соотношению

$$Q = \kappa F \Delta t \quad (1)$$

необходимо определение температурного напора  $\Delta t$ . За исключением простейших случаев расчет  $\Delta t$  производится по сложным формулам.

В практике принято вычисление безразмерных параметров  $\frac{\Delta t}{t'_1 - t'_2}$  [1]

или  $\frac{\Delta t}{\Delta t_{np}}$  [2], [3], которые выражают в функции от 2 безразмерных отношений температур. Обычно применяются графики, по которым определяется температурный напор  $\Delta t$ , а затем по (1) вычисляется поверхность нагрева.

Таким образом, при наличии соответствующих графиков проведение прямого (конструктивного) расчета теплообменника не представляет особых затруднений.

Проведение обратного (проверочного) расчета теплообменника на основании указанных графиков возможно только путем подбора, т. е. многократных расчетов. Неудобным также является использование указанных графиков для расчетов сложных теплообменников, которые могут быть составлены из простых теплообменников.

2.

Бошнякович [2] указал, что расчет теплообменника можно провести без вычисления температурного напора. Из общего уравнения теплового баланса теплообменника

$$W_1 (t'_1 - t''_1) = W_2 (t''_2 - t'_2) = \kappa F \Delta t \quad (1')$$

можно получить критерий поверхности нагрева

$$\varphi = \frac{\kappa F}{W_1} \quad (2)$$

определение которого позволяет подсчитать поверхность нагрева  $F$  непосредственно. Для каждого теплообменника критерий  $\varphi$  можно найти в функции двух других. Бошнякович предложил использовать критерии:

1) критерий водяных эквивалентов

$$R = \frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''}; \quad (3)$$

2) критерий охлаждения горячей жидкости

$$p = \frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'}. \quad (4)$$

В некоторых случаях более удобной является система критериев:

$$\varphi' = \frac{\kappa F}{W_2}, \quad (5)$$

$$R' = \frac{W_2}{W_1} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} \quad (6)$$

и

$$p' = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}. \quad (7)$$

Эта система отличается от предыдущей лишь тем, что „масштабом“ в ней является изменение температур холодной (нагреваемой) жидкости. Очевидно:

$$\varphi = \varphi' R', \quad (8)$$

$$\varphi' = \varphi R, \quad (8')$$

$$p = p' R', \quad (9)$$

$$p' = p R, \quad (9')$$

$$RR' = 1. \quad (10)$$

Наличие этих связей позволяет использовать любые из приведенных критериев, что может дать некоторые упрощения. Используя уравнение теплового баланса теплообменника и определение критериев, можно получить вспомогательные соотношения:

$$\frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = p' = p R, \quad (7')$$

$$\frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2'} = p = p' R', \quad (4')$$

$$\frac{t_1'' - t_2''}{t_1' - t_2'} = 1 - (1 + R)p = 1 - (1 + R')p', \quad (11)$$

$$\frac{t_1'' - t_2'}{t_1' - t_2''} = 1 - p = 1 - p' R', \quad (12)$$

$$\frac{t_1' - t_1''}{t_1' - t_2''} = \frac{p}{1 - p} = \frac{p' R'}{1 - p' R'}, \quad (12')$$

$$\frac{t_1' - t_2''}{t_1' - t_2''} = 1 - p R = 1 - p'. \quad (13)$$

$$\frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''} = \frac{p'}{1 - p'} = \frac{p R}{1 - p R}, \quad (13')$$

$$\frac{t_1' - t_2''}{t_1' - t_1''} = \frac{1}{p} - R = \frac{1}{R'} \left( \frac{1}{p'} - 1 \right), \quad (14)$$

$$\frac{t_1' - t_2''}{t_2'' - t_2'} = \frac{1}{p'} - R' = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{p} - 1 \right). \quad (15)$$

Формулы для вычисления  $\varphi$  или  $\varphi'$  в большинстве случаев имеют более простой вид, чем соотношение для вычисления температурного напора или  $\frac{\Delta t}{\Delta t_{np}}$ . Наличие прямой связи между  $\varphi$ ,  $p$  и  $R$  (или  $\varphi'$ ,  $p'$  и  $R'$ ) позволяет одинаково просто определять поверхность нагрева и проводить поверочный расчет. Более просто решается также задача расчета сложного теплообменника.

3

Для прямого теплообменника связь конечных и начальных температур имеет вид:

$$t_1'' - t_2'' = (t_1' - t_2') e^{-kF \left( \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right)}$$

Простые преобразования дают:

$$\frac{t_1'' - t_2''}{t_1' - t_2'} = e^{-\frac{kF}{w_1} \left( 1 + \frac{w_1}{w_2} \right)}$$

С учетом (2), (3) и (11) имеем:

$$1 - (1 + R)p = e^{-\varphi(1+R)},$$

откуда

$$\varphi = \frac{\ln \frac{1}{1 - p(1+R)}}{1+R} \quad (16)$$

и

$$p = \frac{1 - e^{-\varphi(1+R)}}{1+R} \quad (17)$$

Замена  $\varphi$ ,  $p$  и  $R$  через  $\varphi'$ ,  $p'$ ,  $R'$  по (8), (9) и (10) дает:

$$\varphi' = \frac{\ln \frac{1}{1 - p'(1+R')}}{1+R'} \quad (18)$$

$$p' = \frac{1 - e^{-\varphi'(1+R')}}{1+R'} \quad (19)$$

Расчет поверхности нагрева, т. е. величин  $\varphi$  или  $\varphi'$  по (16) и (18), во всяком случае, не сложнее, чем расчет температурного напора. Задача поверочного расчета может быть решена по соотношению (17) или (19).

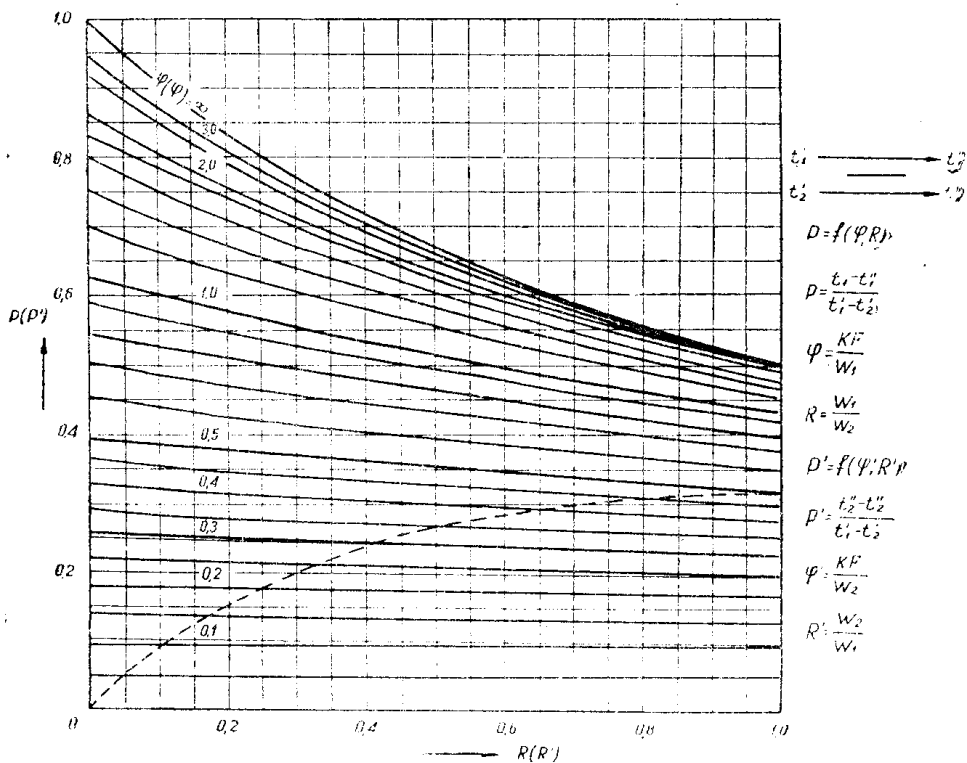


Рис. 1.

Все расчеты упрощаются, если зависимость между критериями дана в виде графика (рис. 1). Значения  $p$  и  $R$  отложены на осях, величина  $\varphi$  является параметром и надписана на кривых. В соответствии с (16), (17), (18) и (19) значения  $p$ ,  $R$  и  $\varphi$  на данном графике можно заменить соответственно значениями  $p'$ ,  $R'$  и  $\varphi'$ . Поэтому на оси абсцисс значение  $R$  дано в пределах от 0 до 1, так как при  $R > 1$  мож-

но перейти к  $R' = \frac{1}{R} < 1$ , соответственно переименовав и другие обо-

значения.

Аналогичные выводы для противоточного теплообменника дают зависимости:

$$\varphi = \frac{\ln \frac{1-pR}{1-p}}{1-R} \quad (20)$$

$$p = \frac{1 - e^{-\varphi(1-R)}}{1 - R e^{-\varphi(1-R)}} \quad (21)$$

а также

$$\varphi' = \frac{\ln -p'R'}{1-R'} \quad (22)$$

$$p' = \frac{1 - e^{-\varphi'(1-R')}}{1 - R' e^{-\varphi'(1-R')}} \quad (23)$$

Соответственный расчетный график дан на рис. 2.

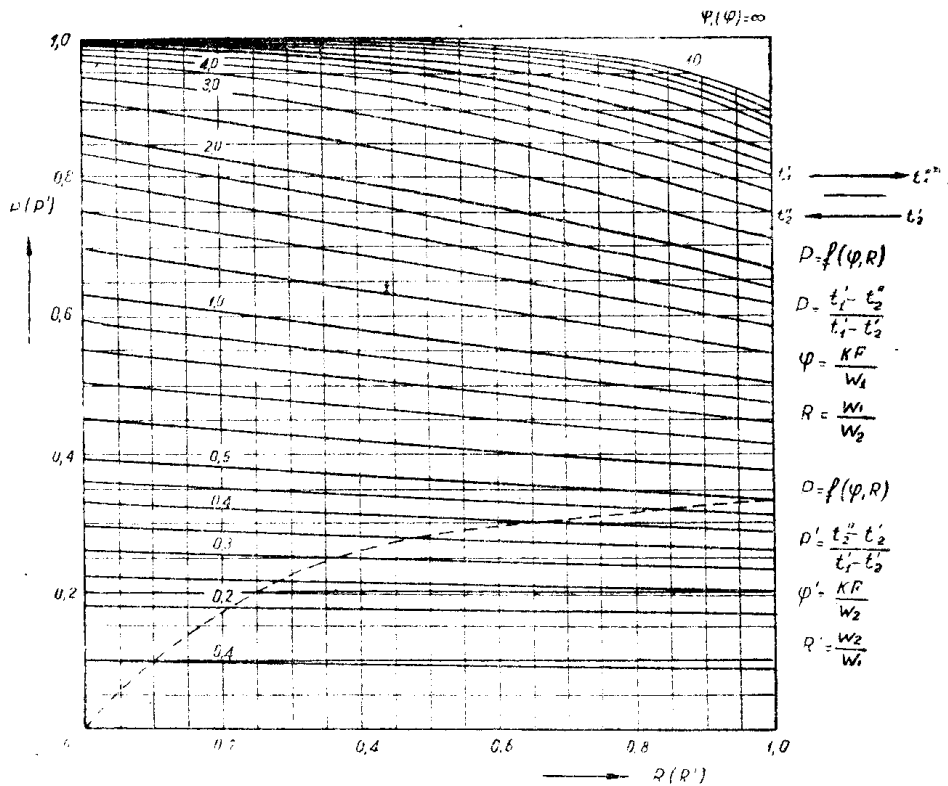


Рис. 2.

4.

Вывод связи  $\varphi = f(p, R)$  для перекрестно-точного теплообменника при перемешивании горячей жидкости сделан по методике, изложенной в [1]. В результате получено

$$\varphi = \frac{\ln \frac{1}{1 + R \ln(1-p)}}{R} \quad (24)$$

$$v = 1 - e^{-\frac{1-c}{R} \varphi} \quad (2)$$

График для расчетов по этим соотношениям дан на рис. 3. Учитывая соотношения (8), (9) и (10), имеем также

$$\varphi' = \ln \frac{R'}{R' + \ln(1 - p'R')} \quad (26)$$

$$p' = \frac{1 - e^{-R'(1 - e^{-\varphi'})}}{R'} \quad (27)$$

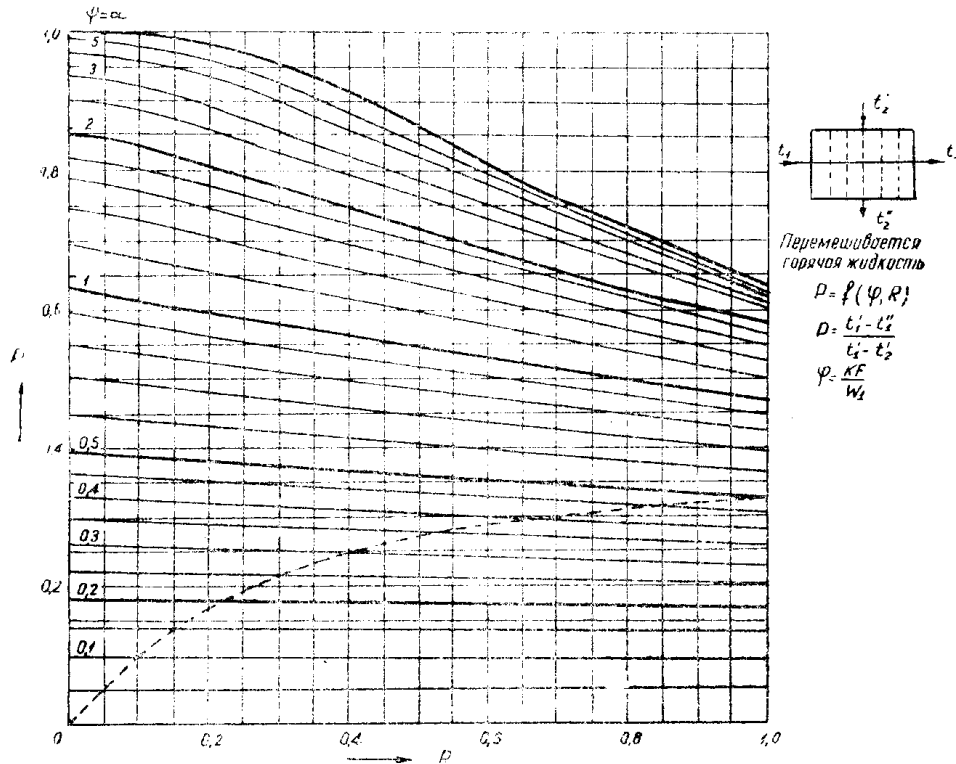


Рис. 3.

График для расчета по этим соотношениям дан на рис. 4.

Для перекрестно-точного теплообменника с перемешиванием холодной жидкости получается

$$\varphi = \ln \frac{R}{R + \ln(1 - pR)} \quad (28)$$

$$p = \frac{1 - e^{-R(1 - e^{-\varphi})}}{R} \quad (29)$$

$$\varphi' = \frac{\ln \frac{1}{1 + R' \ln(1 - p')}}{R'} \quad (30)$$

$$p' = 1 - e^{-\frac{1 - e^{-\varphi'} R'}}{R'} \quad (31)$$

Сравнивая между собой соотношения (24), (25), (26), (27) и (28), (29), (30) и (31), мы убеждаемся, что для этого случая нет необходимости строить новые графики. График рис. 3 может рассматриваться как изображение зависимости  $\varphi' = f(p', R')$  для перекрестного теплообменника с перемешиванием холодной жидкости, а график на рис. 4—как изображение зависимости  $\varphi = f(p, R)$  для этого же случая.

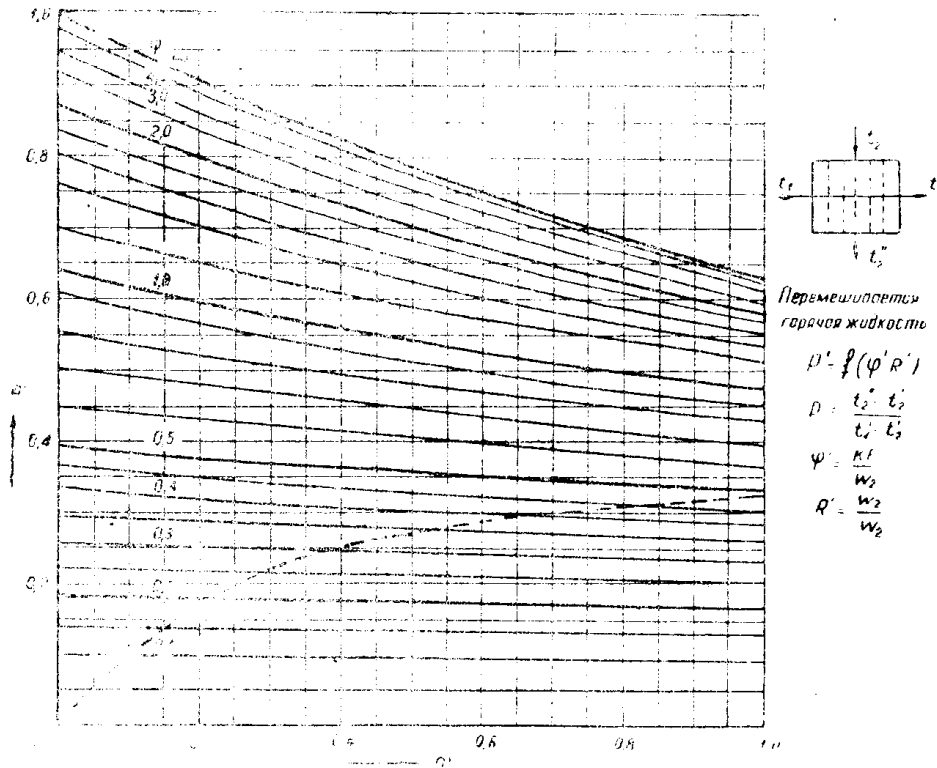


Рис. 4.

Для перекрестно-точного теплообменника с перемешиванием горячей и холодной жидкости одновременно расчет дает

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{1 - e^{-\varphi}} + \frac{R}{1 - e^{-\varphi R}} - \frac{1}{\varphi} \quad (32)$$

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{1 - e^{-\varphi'}} + \frac{R'}{1 - e^{-\varphi' R'}} - \frac{1}{\varphi'} \quad (33)$$

Расчетный график по этим соотношениям приведен на рис. 5.

Для перекрестно-точного теплообменника, в котором теплообменивающиеся жидкости не перемешиваются, использовано решение, данное Нуссельтом [5]. В результате численного интегрирования связь  $\varphi = f(p, R)$  была получена в табличном виде. Соответственный график приведен на рис. 6.

5.

Параллельно-смешанный теплообменник с перемешиванием горячей жидкости, схема которого приведена на рис. 7, рассмотрен

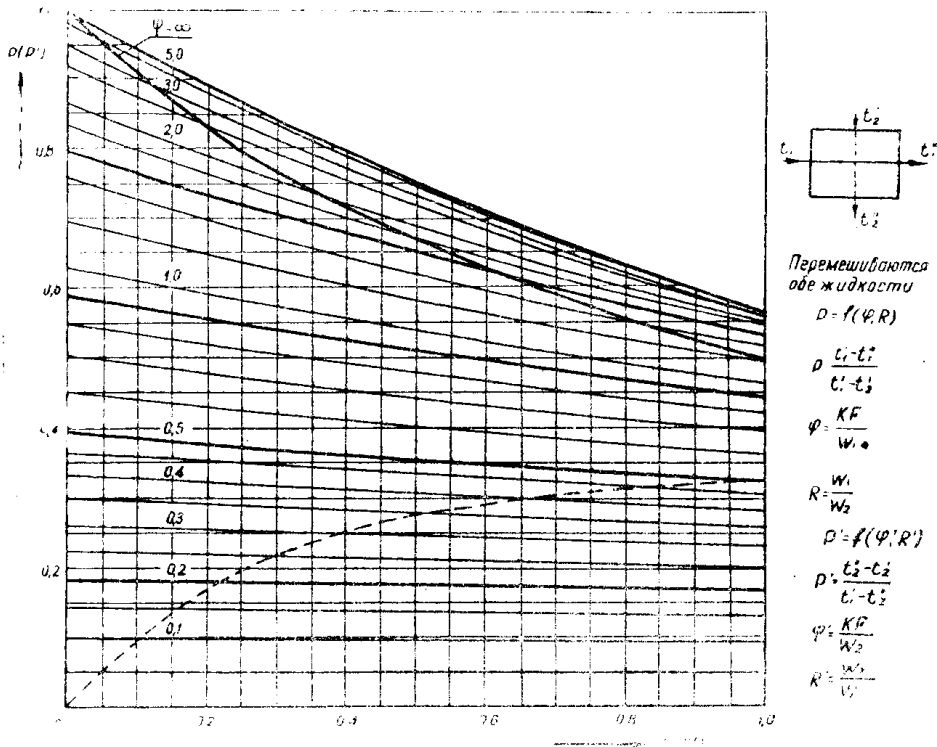


Рис. 5.

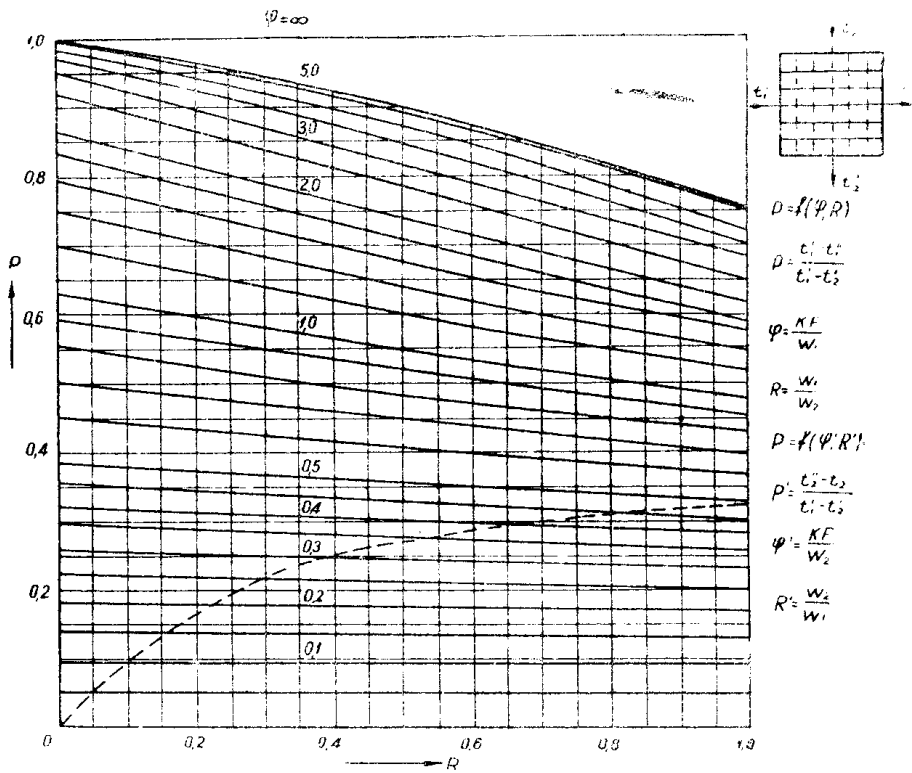


Рис. 6.



Ундервудом (цитируется по [6]). Расчет дает

$$\varphi' = \frac{\ln \frac{2-p'[1+R'-\sqrt{1+R'^2}]}{2-p'[1+R'+\sqrt{1+R'^2}]}{\sqrt{1+R'^2}}, \quad (34)$$

$$p' = \frac{1 - e^{-\varphi' \sqrt{1+R'^2}}}{\frac{1+R'-\sqrt{1+R'^2}}{2} - \frac{1+R'+\sqrt{1+R'^2}}{2} e^{-\varphi' \sqrt{1+R'^2}}} \quad (35)$$

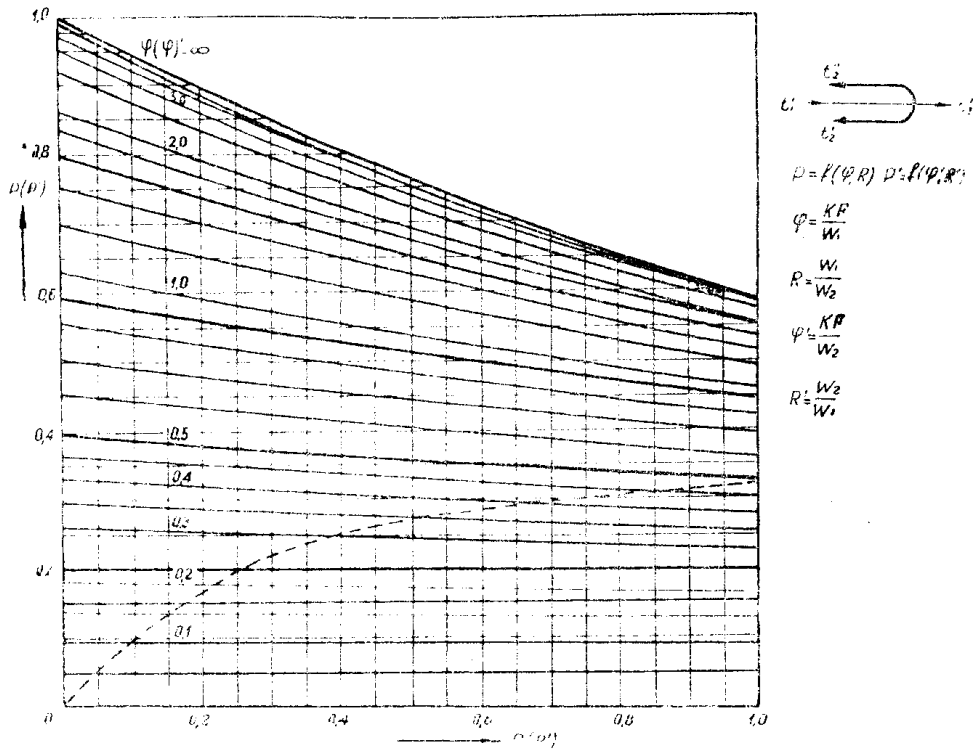


Рис. 7.

С учетом (8), (9) и (10) имеем также

$$\varphi = \frac{\ln \frac{2-p[1+R-\sqrt{1+R^2}]}{2-p[1+R+\sqrt{1+R^2}]}{\sqrt{1+R^2}} \quad (36)$$

и

$$p = \frac{1 - e^{-\varphi \sqrt{1+R^2}}}{\frac{1+R+\sqrt{1+R^2}}{2} - \frac{1+R-\sqrt{1+R^2}}{2} e^{-\varphi \sqrt{1+R^2}}} \quad (37)$$

График, выражающий зависимость  $\varphi = f(p, R)$  или  $\varphi' = f(p', R')$  для этого теплообменника, помещен на рис. 7. Те же соотношения и графики будут иметь место для двухходового параллельно-смешанного теплообменника, в котором горячая жидкость делает два хода.

Схема параллельно-смешанного теплообменника, в котором перемешивается горячая жидкость, а холодная жидкость проходит 4 па-

параллельных хода, дана на рис. 8. Для элемента поверхности  $df$  можно записать уравнения теплопередачи

$$W_2 d\vartheta_e = \frac{\kappa df}{4} (\vartheta - \vartheta_e),$$

$$-W_2 d\vartheta_m = \frac{\kappa df}{4} (\vartheta - \vartheta_m),$$

$$W_2 d\vartheta_n = \frac{\kappa df}{4} (\vartheta - \vartheta_n),$$

$$-W_2 d\vartheta_r = \frac{\kappa df}{4} (\vartheta - \vartheta_r)$$

и уравнение теплового баланса

$$-W_1 d\vartheta = W_2 (d\vartheta_e - d\vartheta_m + d\vartheta_n - d\vartheta_r).$$

Здесь  $\vartheta$  — текущая температура горячей жидкости,  $\vartheta_e$  — текущая температура холодной жидкости в 1 ходе,  $\vartheta_m$  — во втором и т. д. Начало координат находится в месте входа горячей жидкости.

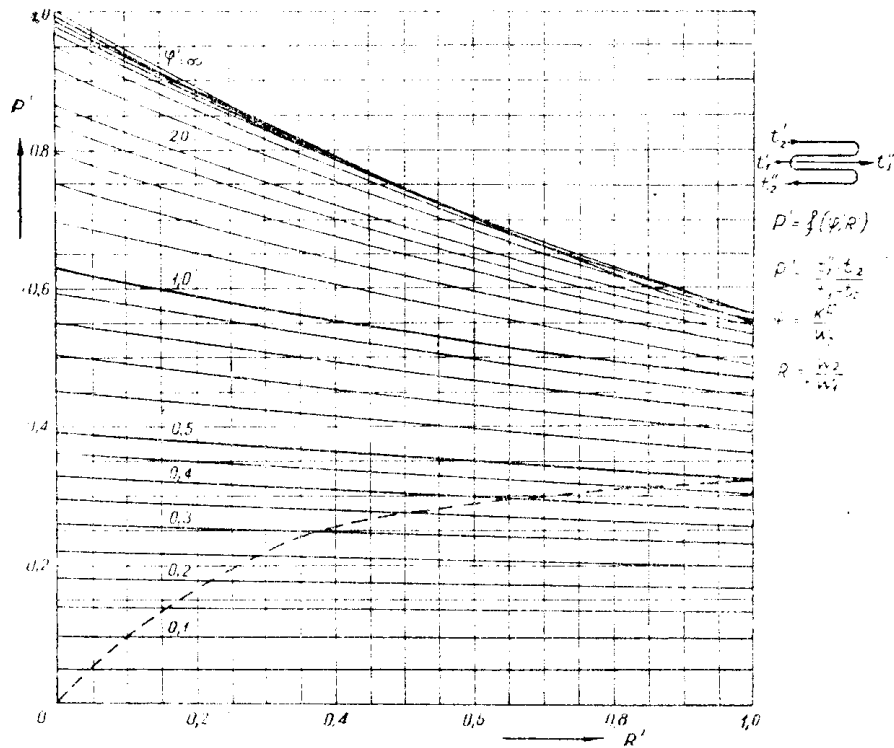


Рис. 8.

Решение этой системы уравнений с учетом того, что на входной стороне  $\vartheta_m = \vartheta_n$ ;  $\vartheta_e = t'_2$  и  $\vartheta = t'_1$ ; на выходной стороне  $\vartheta_e = \vartheta_m$ ;  $\vartheta_n = \vartheta_r$ ;  $\vartheta = t'_2$  дает возможность определения всех температур  $\vartheta$ ,  $\vartheta_e$ ,  $\vartheta_m$ ,  $\vartheta_n$  и  $\vartheta_r$ . Для подсчета  $p'$  используем соотношение (7). В итоге получается

$$p' = \frac{1 - e^{-\frac{\varphi' \sqrt{1+4R'^2}}{2}}}{1 - e^{-\frac{\varphi' \sqrt{1+4R'^2}}{2}}} \left[ \frac{1+2R' + \sqrt{1+4R'^2}}{4} + \frac{1}{2(1+e^{-\frac{\varphi' \sqrt{1+4R'^2}}{2}})} \right] - \left[ \frac{1+2R' - \sqrt{1+4R'^2}}{4} + \frac{1}{2(1+e^{-\frac{\varphi' \sqrt{1+4R'^2}}{2}})} \right] e^{-\frac{\varphi' \sqrt{1+4R'^2}}{2}} \quad (38)$$

График для расчета по этой зависимости дан на рис. 8. Используя соотношения (8'), (9') и (10'), можно в (38) заменить  $p'_1$ ,  $R'$  и  $\varphi$  через  $p$ ,  $R$  и  $\varphi$ . Получится

$$p = \frac{\varphi \sqrt{4+R^2}}{1 - e^{-\frac{\varphi \sqrt{4+R^2}}{2}}} \left[ \frac{2+R+\sqrt{4+R^2}}{4} + \frac{R}{2(1+e^{-\frac{\varphi R}{2}})} \right] - \left[ \frac{2+R-\sqrt{4+R^2}}{4} + \frac{R}{2(1+e^{-\frac{\varphi R}{2}})} \right] e^{-\frac{\varphi \sqrt{4+R^2}}{2}} \quad (39)$$

Соответствующий график приведен на рис. 9. Такие же соотношения для  $p'$  и  $p$  получаются в случае течения горячей жидкости в противоположном направлении.

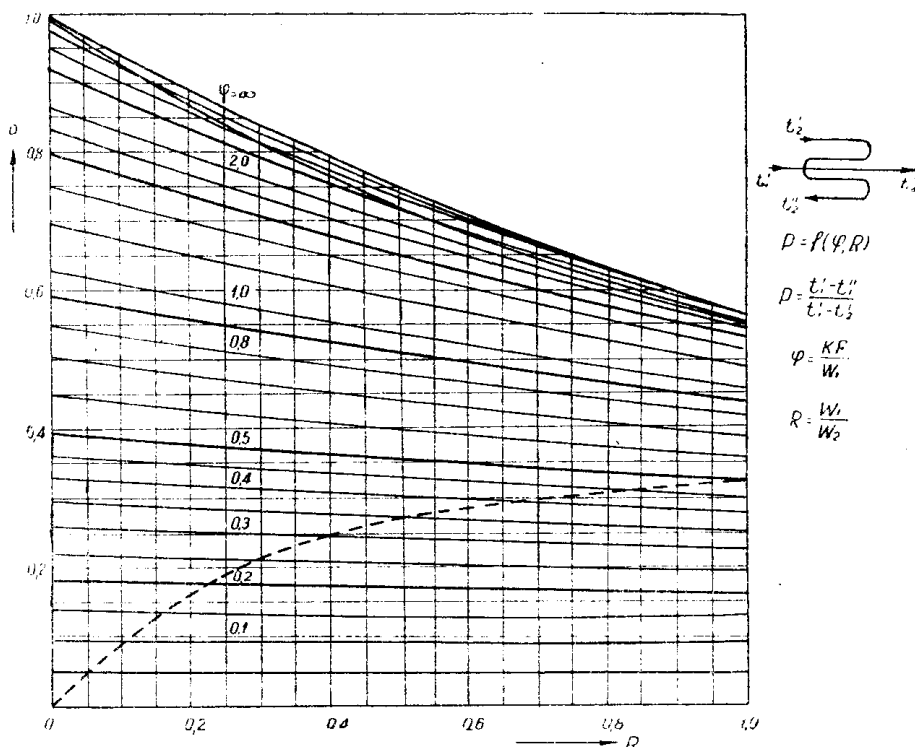


Рис. 9.

Для четырехходового параллельно-смешанного теплообменника в котором горячая жидкость делает 4 хода, получаются аналогичные соотношения, если заменить  $p$ ,  $\varphi$  и  $R$  на  $p'$ ,  $\varphi'$  и  $R'$ . Поэтому для их расчета могут быть использованы те же графики 8 и 9 с соответствующей заменой обозначений.

## 6.

Для параллельно-смешанного теплообменника с 3 ходами, схема которого приведена на рис. 10, определение  $p'$  производится по формуле

$$p' = \frac{y-1}{y-R'}, \quad (40)$$

где

$$y = \frac{e^{2\varphi'} - Ee^{\gamma\varphi'}}{1-E} \quad (41)$$

и

$$E = \frac{1+\gamma}{1+\beta} \frac{e^{2\varphi'} + e^{\gamma\varphi'}}{e^{\gamma\varphi'} + e^{2\varphi'}} \quad (42)$$

$\beta$  и  $\gamma$  представляют собою корни квадратного уравнения и равны соответственно:

$$\beta = -0,5R' \pm \sqrt{(0,5R')^2 + \frac{(1-R')}{9}}, \quad (43)$$

$$\gamma = -0,5R' \pm \sqrt{(0,5R')^2 - \frac{1-R'}{9}}. \quad (44)$$

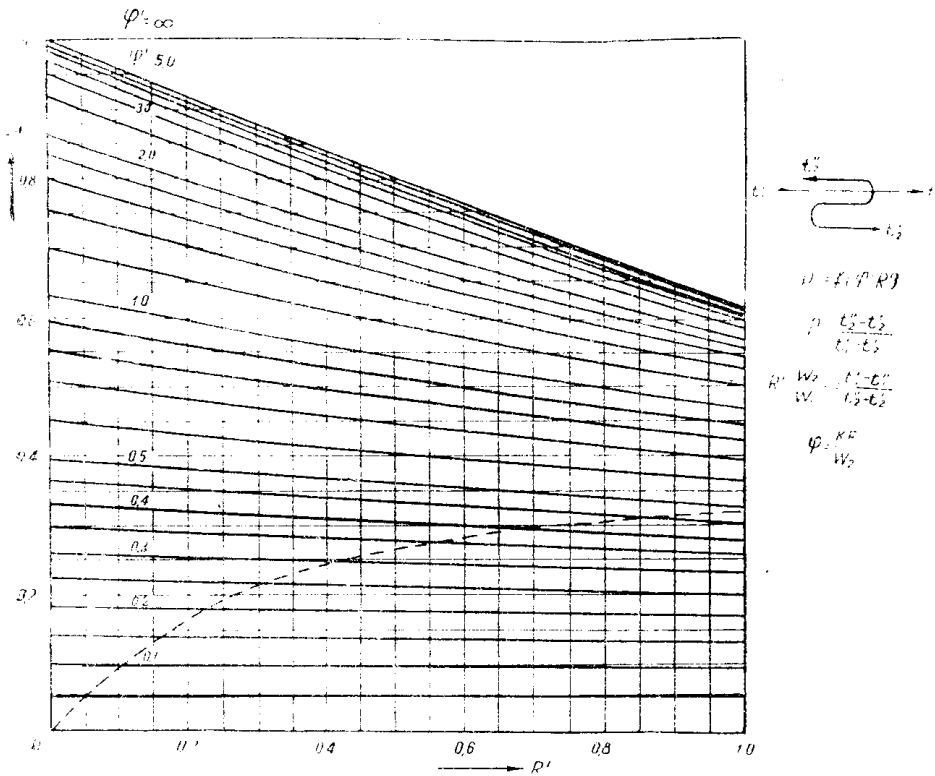


Рис. 10.

График для расчета по этим зависимостям приведен на том же рисунке. Используя соотношения (8), (9) и (10), получаем также

$$p = \frac{y - 1}{Ry - 1}, \quad (45)$$

где

$$y = \frac{e^{3\varphi} - Ee^{\gamma\varphi}}{1 - E} \quad (46)$$

и

$$E = \frac{R + \gamma_1}{R + \beta_1} \frac{e^{3\varphi} + e^{\frac{R\varphi}{3}}}{e^{\gamma\varphi} + e^{\frac{R\varphi}{3}}}. \quad (47)$$

Величины  $\beta_1$  и  $\gamma_1$  вычисляются по формулам:

$$\beta_1 = -0,5 \pm \sqrt{0,25 - \frac{R(1-R)}{9}}, \quad (48)$$

$$\gamma_1 = -0,5 - \sqrt{0,25 - \frac{R(1-R)}{9}} \quad (49)$$

График для расчетов по этим соотношениям приведен на рис. 11.

Расчет значения  $p'$  для параллельно-смешанного теплообменника с пятью ходами нагреваемой жидкости, схема которого приведена на рис. 12, производится по соотношению (40). Величина  $u$  вычисляется по (41), а значение  $E$  по формуле

$$E = \frac{1 + \gamma}{1 + \beta} \frac{2e^{\varphi/5} + e^{-\varphi/5} + e^{3\varphi}(1 + 2e^{-\frac{2}{5}\varphi})}{2e^{\varphi/5} + e^{-\varphi/5} + e^{3\varphi}(1 + 2e^{-\frac{2}{5}\varphi})} \quad (50)$$

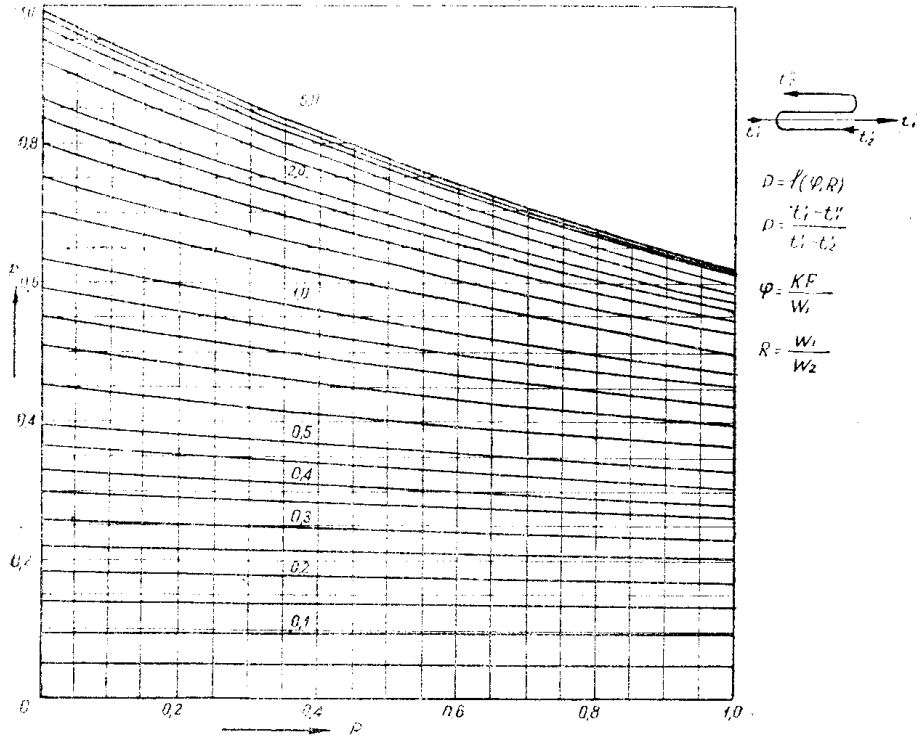


Рис. 11.

Причем

$$\beta = 0,5R' + \sqrt{0,25R_2' + \frac{1-R'}{25}} \quad (51)$$

и

$$\gamma = 0,5R' - \sqrt{0,25R_2' + \frac{1-R'}{25}} \quad (52)$$

График для расчета этого теплообменника приведен на этом же рисунке. Можно также использовать соотношения (45) и (46). При этом

$$E = \frac{R + \gamma_1}{R + \beta_1} \frac{2e^{\frac{\varphi R}{5}} + e^{-\frac{\varphi R}{5}} + e^{\beta_1 \varphi} (1 + 2e^{-\frac{2\varphi R}{5}})}{2e^{\frac{\varphi R}{5}} + e^{-\frac{\varphi R}{5}} + e^{\gamma_1 \varphi} (1 + 2e^{-\frac{2\varphi R}{5}})} \quad (53)$$

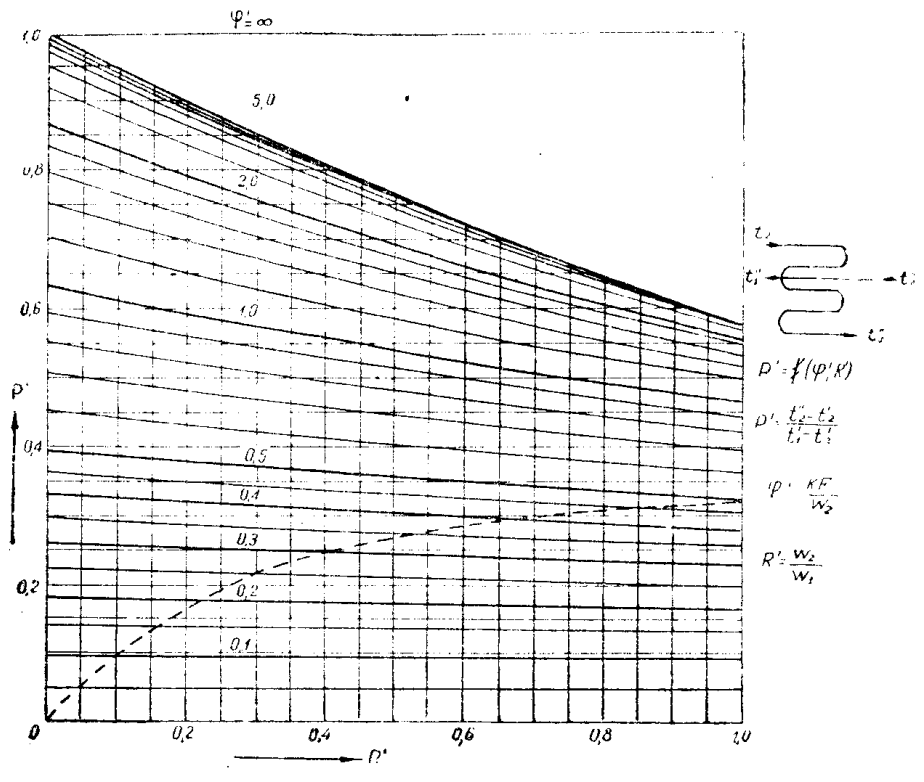


Рис. 12.

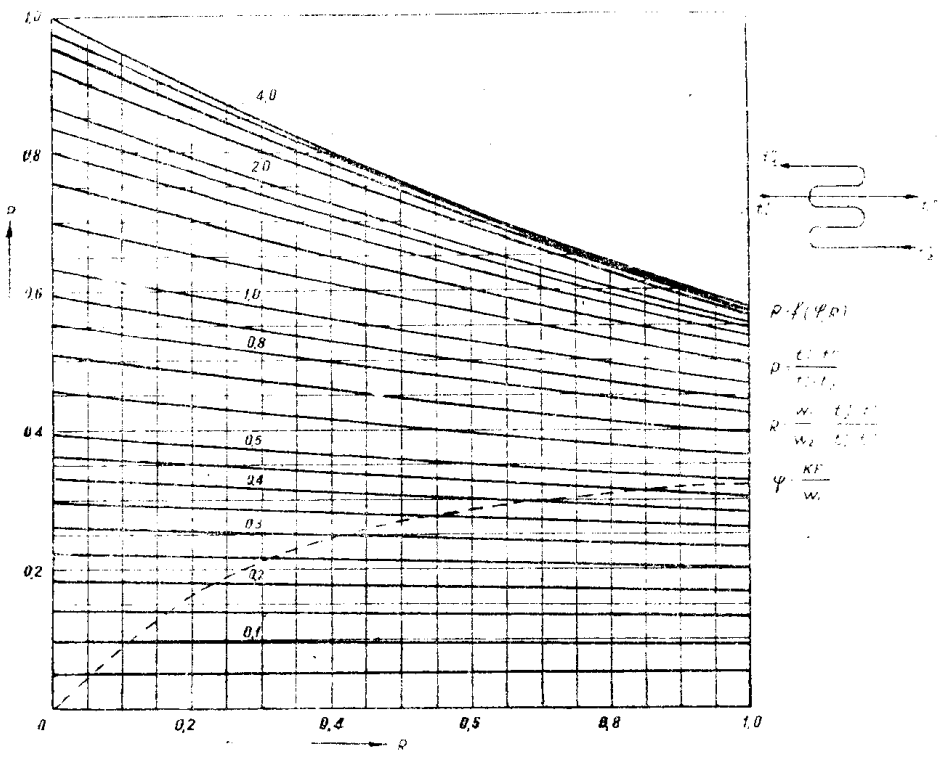


Рис. 13.

$$\beta_1 = 0,5 + \sqrt{0,25 - \frac{R(1-R)}{25}}, \quad (54)$$

$$\gamma_1 = 0,5 - \sqrt{0,25 - \frac{R(1-R)}{25}}. \quad (55)$$

График для расчета по этим соотношениям дан на рис. 13.

7.

Приведенные расчетные соотношения позволяют провести исследование и сравнение работы отдельных типов теплообменников. Если одна из теплообменивающих жидкостей сохраняет постоянную температуру, то ее водяной эквивалент следует считать равным бесконечности. Так, если  $W_2 = \infty$ , то  $R = 0$ . Независимо от характера теплообменника и взаимного направления течения горячей и холодной жидкости из (17), (21), (29), (32), (37), (39), (40) и (45) получаем

$$p = 1 - e^{-\varphi} \quad (56)$$

и

$$\varphi = \ln \frac{1}{1-p}. \quad (57)$$

По этим соотношениям, используя (2) и (4), может рассчитываться, например, участок поверхности нагрева парового котла, в котором происходит парообразование. Аналогично при  $R' = 0$

$$p' = 1 - e^{-\varphi'}, \quad (56')$$

$$\varphi' = \ln \frac{1}{1-p'}. \quad (57')$$

Если поверхность нагрева увеличивать, то в пределе  $\varphi = \infty$  и  $\varphi' = \infty$ . При этом достигается предельное охлаждение горячей жидкости и предельный нагрев холодной жидкости. Соответственные предельные температуры могут быть найдены из (4) и (7), если предварительно определить  $p_{\text{пред}}$  и  $p'_{\text{пред}}$ . Эти величины можно найти из соответствующих соотношений для данного теплообменника. Так, для противоточного теплообменника при  $R < 1$  из (21) имеем  $p_{\text{пред}} = 1$ . По (4) это обозначает, что  $t_{1\text{пред}} = t'_2$ , т. е. горячая жидкость будет остывать до начальной (входной) температуры холодной жидкости. Холодная жидкость при этом не нагреется до начальной температуры горячей жидкости. Действительно, в этом случае  $p' > 1$ . Поэтому соотношение (23) переписывается так:

$$p' = \frac{1 - e^{\varphi'(R'-1)}}{1 - R'e^{\varphi'(R'-1)}}. \quad (23')$$

Раскрыв неопределенность ( $\varphi' = \infty$ ), получаем

$$p'_{\text{пред}} = \frac{1}{R'} < 1. \quad (58)$$

В соответствии с (7) это обозначает, что

$$t_{2\text{пред}} < t'_1.$$

Аналогично при  $R' < 1$  ( $R > 1$ ) получаем

$$p'_{\text{пред}} = 1 \quad (59)$$

и

$$p_{\text{пред}} = \frac{1}{R}. \quad (59')$$

Это обозначает, что в этом случае холодная жидкость нагревается до входной температуры горячей жидкости:

$$t_{2\text{пред}} = t'_1,$$

а

$$t_{1\text{пред}} < t'_2.$$

В прямоточном теплообменнике условие  $\varphi = \infty$  приводит, исходя из соотношений (17) и (19), к равенствам:

$$p_{\text{пред}} = \frac{1}{1+R}, \quad (60)$$

$$p'_{\text{пред}} = \frac{1}{1+R'} = \frac{R}{1+R}. \quad (60')$$

С учетом (3), (4) и (7) это дает

$$t_{2\text{пред}} = t_{1\text{пред}}.$$

Во всех других теплообменниках предельная степень охлаждения горячей жидкости и нагрева холодной жидкости будет промежуточной величиной между соответствующими величинами для противоточного и прямоточного. Так, для перекрестно-точного теплообменника с перемешиванием горячей жидкости соотношение (25) дает:

$$p_{\text{пред}} = 1 - e^{-\frac{1}{R}}. \quad (61)$$

Легко показать, что

$$1 > 1 - e^{-\frac{1}{R}} > \frac{1}{1+R}.$$

В перекрестно-точном теплообменнике с перемешиванием обеих жидкостей соотношения (32) и (33) при  $\varphi = \infty$  дают

$$p_{\text{пред}} = \frac{1}{1+R}, \quad (62)$$

$$p'_{\text{пред}} = \frac{1}{1+R'}. \quad (62')$$

Таким образом, предельная передача тепла в перекрестно-точном теплообменнике с перемешиванием обеих жидкостей будет такой же, как в прямоточном теплообменнике (при тех же  $\varphi$  и  $R$ ). Если же перемешивается горячая жидкость, а холодная не перемешивается, то



при тех же  $\varphi$  и  $R$  будет передаваться больше тепла. Еще больше при этих условиях будет передача тепла в перекрестно-точном теплообменнике, в котором жидкости текут без перемешивания.

В параллельно-смешанном теплообменнике с нечетным числом ходов (см. рис. 10 и 12) предельная степень нагрева холодной жидкости такая же, как в противоточном теплообменнике, т. е.  $p'_{\text{пред}}=1$ . Так, для трехходового теплообменника из соотношения (42) имеем:

$$E = \frac{1+\gamma}{1+\beta} \frac{1 + e^{(\beta - \frac{1}{3})\varphi'}}{1 + e^{(\gamma - \frac{1}{3})\varphi'}}. \quad (42')$$

Из (44) видно, что  $\gamma < 0$ , следовательно,  $\gamma - \frac{1}{3} < 0$ . Поэтому  $e^{(\gamma - \frac{1}{3})\varphi'}$  при  $\varphi' \rightarrow \infty$  стремится к нулю. Из (43) видно, что при  $R'=0$   $\beta = \frac{1}{3}$ , а при  $R'=1$   $\beta=1$ . Следовательно, при  $0 < R' < 1$   $\beta < \frac{1}{3}$ .

Поэтому  $\beta - \frac{1}{3} < 0$  и величина  $e^{(\beta - \frac{1}{3})\varphi'}$  при  $\varphi' \rightarrow \infty$  стремится к нулю. Следовательно, предельное значение  $E$  при  $\varphi' = \infty$  будет

$$E_{\text{пред}} = \frac{1+\gamma}{1+\beta}. \text{ При этих условиях, как видно из (41), } u_{\text{пред}} = \infty \text{ и по}$$

(40)  $p'_{\text{пред}}=1$ . Такой же результат получается при рассмотрении теплообменника с 5 ходами.

Если сопоставить численные значения  $p'$  из графиков на рис. 11 и 12, то оказывается, что при  $\varphi' < 1$  и одинаковых  $k$  и  $R'$  в трех и пятиходовом теплообменниках практически передача тепла одинакова. При  $\varphi' > 1$  в трехходовом теплообменнике передается на единице поверхности больше тепла, чем в пятиходовом.

Для двухходового параллельно-смешанного теплообменника (рис. 7) предельная степень нагрева холодной жидкости получается из (35) при  $\varphi' = \infty$

$$p'_{\text{пред}} = \frac{2}{1+R' + \sqrt{1+(R')^2}}. \quad (35')$$

Аналогично для четырехходового теплообменника (рис. 8) из (38)

$$p'_{\text{пред}} = \frac{4}{3+2R' + \sqrt{1+4(R')^2}}. \quad (38')$$

Величина  $p'_{\text{пред}}$  из (35') и (38') меньше 1 и больше  $\frac{1}{1+R}$ . Таким образом, предельные температуры в параллельно-смешанных теплообменниках с четным числом ходов будут средними между соответствующими величинами для противоточного и прямоточного теплообменников.

Сопоставляя между собой графики на рис. 7 и 8, мы убеждаемся, что при  $\varphi' \leq 1$  величина  $p'$  для двухходовых и четырехходовых

теплообменников практически одинакова, т. е. в этих теплообменниках передача тепла на единицу поверхности нагрева (при одинаковых  $\kappa$  и  $R'$ ) одна и та же. При  $\varphi' > 1$  в двухходовом теплообменнике передача тепла на единицу поверхности нагрева больше, чем в четырехходовом.

Наконец, сопоставление графиков на рис. 5, 7, 8, 10 и 12 показывает, что при  $\varphi' \leq 1$  и одинаковых значениях  $\kappa$  и  $R'$  значения  $p'$  отличаются на величину, меньшую 1%, т. е. практически одинаковы. Поэтому при  $\varphi' \leq 1$  практически можно вести расчеты для перекрестно-точных теплообменников с перемешиванием обеих жидкостей и параллельно-смешанных теплообменников с 2, 3, 4 и 5 ходами, по которым течет нагреваемая жидкость, по любой из зависимостей (33), (34), (35), (38) и 40. Наиболее удобным в этом случае окажется применение соотношений (34) и (35). Необходимо при этом еще раз подчеркнуть, что это допустимо лишь при  $\varphi \leq 1$ .

## 8.

Приведенные соотношения для расчета теплообменников могут быть использованы непосредственно или с помощью построенных по ним графиков для прямого и поверочного расчета.

При прямом расчете по заданным величинам температур и водяных эквивалентов, используя соотношения (3), (4), (5) и (6), можно найти  $p$  и  $R$  (или  $p'$  и  $R'$ ). По соответствующему уравнению или графику определяется  $\varphi$  (или  $\varphi'$ ), а затем по (2) или (5) вычисляется величина поверхности нагрева.

При поверочном расчете теплообменника могут быть разные случаи. Если заданы поверхность нагрева  $F$ , коэффициент теплопередачи  $\kappa$ , водяные эквиваленты  $W_1$  и  $W_2$  и 2 любых температуры на входе и выходе, то определение двух других температур производится также по соответствующим уравнениям или графикам непосредственно. Так, например, пусть заданы  $\kappa$ ,  $F$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $t'_1$  и  $t'_2$ . Тогда по (2) и (3) можно найти значения  $\varphi$  и  $R$  или по (5) и (6) значения  $\varphi'$  и  $R'$ . Затем по соответствующему уравнению или графику определяется значение  $p$  или  $p'$ . Используя соотношения (4) и (3) или (7) и (6) получаем для определения искоемых значений  $t_1'$  и  $t_2''$  систему из двух уравнений с двумя неизвестными. Аналогичным образом решается задача, если заданы  $\kappa$ ,  $F$  и все температуры на входе и выходе, а требуется найти значения водяных эквивалентов теплообменивающихся жидкостей. Как известно, эти случаи поверочного расчета являются наиболее частыми.

Необходимость в добавочном построении и проведении расчета подбором может возникнуть в тех случаях, когда заданы  $\kappa$ ,  $F$ , один из водяных эквивалентов и 3 температуры и требуется определить четвертую температуру и второй водяной эквивалент. Так, например, пусть заданы  $\kappa$ ,  $F$ ,  $W_1$ ,  $t_1'$ ,  $t_2'$  и  $t_1''$  и требуется найти  $W_2$  и  $t_2''$ . Из (2) и (4) определяются  $\varphi$  и  $p$ , а затем по соответствующему уравнению или графику—значение  $R$ . Наконец из (3) вычисляются  $W_2$  и  $t_2''$ .

При использовании для расчета графиков может возникнуть затруднение, если в данном случае окажется  $R > 1$ . Тогда на график зависимости  $p = f_1(\varphi, R)$ , используя график  $p' = f_2(\varphi', R')$ , надо нанести кривую  $p = f(\varphi, R')$  для данного значения  $\varphi = \varphi_g$ . Значения  $R'$  при этом откладываются на оси абсцисс графика  $p = f_1(\varphi, R)$  в том же масштабе, что и значения  $R$ . Искомая кривая пройдет через начало координат ( $R' = 0$ ,  $R = \infty$ ) и через точку  $p$  при  $R = 1$ , так как при этом  $R' = 1$  и  $p' = p$ . Промежуточные точки можно найти следующим образом.



$$p = \frac{\varphi}{1 + 0,58 \varphi} \left( 1 - \frac{a\varphi}{1 + b\varphi} R \right), \quad (63)$$

$$p' = \frac{\varphi'}{1 + 0,58 \varphi'} \left( 1 - \frac{a\varphi'}{1 + b\varphi'} R' \right).$$

Величины  $a$  и  $b$  для различных типов теплообменников имеют значения, данные в этой таблице

Тип теплообменника	$a$	$b$
Прямоточный	0,42	0,33
Противоточный	0,42	1,00
Перекрестно-точные теплообменники с перемешиванием обеих или одной из теплообменивающих жидкостей, параллельно смешанные теплообменники с 2, 3, 4 и 5 ходами	0,40	0,40
Перекрестно-точные теплообменники, в которых теплообменивающиеся жидкости не перемешиваются	0,40	0,60

Для прямого расчета из (63) получается:

$$\varphi = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 2\beta\varphi}}{3}, \quad (64)$$

где

$$\alpha = (1 - 0,58 p) - bp \quad (65)$$

и

$$\beta = 2 [aR - (1 - 0,58 p) b]. \quad (66)$$

Реальное значение по (64) имеет, очевидно, лишь положительное решение.

Поверочные расчеты показали, что ошибка при использовании указанных приближенных соотношений не выходит за пределы 2%. Необходимо еще раз подчеркнуть, что они пригодны лишь до значений  $\varphi < 1$  или  $\varphi' < 1$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Smith. Mean temperature difference in cross flow. Engineering, 1934.
2. М. А. Михеев. Основы теплопередачи, ГЭИ, 1956.
3. Температурный напор. Из проекта норм теплового расчета котельного агрегата. Теплоэнергетика, 1955.
4. Bosnjakovic. Berechnung der Wärmeaustauschern. Schweizerische Bauzeitung, 1951.
5. Nusselt W. Der Wärmeübergang im Kreuzstrom Band 55 Nr. 48. V. D. J., 1911.
6. Hausen. Wärmeübertragung in Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom, 1950.