

УДК 536.27

**Расчет среднего температурного напора в перекрестно-точных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами**

Б.Б. Флейтлих

Рассмотрены методы расчета значения величины среднего температурного напора в одноходовых по обеим полостям перекрестноточных теплообменных аппаратах с неперемешивающимися средами. Произведено сравнение распространенных в практике методов расчета среднего температурного напора в одноходовых перекрестноточных теплообменниках. Предложена алгоритмизация метода Смита.

Ключевые слова: средний температурный напор; перекрестный ток; метод Смита

**ВВЕДЕНИЕ**

Увеличение объемов вычислений, связанное с разработкой и экспериментальным исследованием разрабатываемых конструкции теплообменников, требует разработки алгоритмов и программ для конструкторского теплогидравлического расчета теплообменников и обработки результатов их экспериментальных исследований. Разработка программ для таких вычислений сталкивается с серьезными затруднениями в части отсутствия алгоритма для точного определения поправок на тип перекрестный ток теплоносителей.

Смитом [1] на основе работ Нуссельта [2,3] предложено решение задачи распределения температур при перекрестном токе в одноходовом по обеим полостям теплообменном аппарате с неперемешивающимися теплоносителями.

Согласно [2,3] тепло, переданное через каждый элемент элементарной поверхности, согласно уравнению теплопередачи, можно приравнять к определенному количеству тепла, которое обусловлено изменением температур потоков теплоносителей каждой полости. Водяные эквиваленты теплоносителей, текущих вдоль  $x'$  и  $y'$  обозначаются  $W$  и  $w$  соответственно.

Следовательно:

$$\begin{cases} K \cdot (T - t) \cdot dx' \cdot dy' = -\frac{W}{y} \cdot dy' \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx' \\ K \cdot (T - t) \cdot dx' \cdot dy' = -\frac{w}{x} \cdot dx' \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \cdot dy' \end{cases} \quad (1)$$

Смитом вводятся обозначения:

$$x' = \frac{x}{X} \cdot \frac{k \cdot F}{W}; \quad u \quad y' = \frac{y}{Y} \cdot \frac{k \cdot F}{w} \quad (2)$$

где  $k$ - коэффициент теплопередачи,  $F$  – площадь теплообменной поверхности, а  $X$  и  $Y$  – длины теплообменных поверхностей вдоль осей  $x'$  и  $y'$  тока соответственно 1-го и 2-го теплоносителей.

Дифференциальное уравнение (1) с учетом (2) принимает вид:

$$T - t = -\frac{\partial T}{\partial x'} = +\frac{\partial t}{\partial y'} \quad (3)$$

Решение уравнения (3) находится при граничных условиях  $T=T_1$  при  $x'=0$  и  $t=t_1$  при  $y'=0$ .

Решение, которое даёт распределение температур можно выразить в виде двойного бесконечного ряда:

$$\frac{T - t_1}{T_1 - t_2} = 1 + \sum_{u=1}^{\infty} \sum_{v=1}^{\infty} \left\{ (-1)^{u+v} \frac{(u+v)!}{u!(u+1)!v!(v+1)!} (x')^u (y')^v \right\} \quad (4)$$

Общее количество переданного тепла определяется как  $W \cdot (T_{11} - T_{12})$ , при  $x=X$ ,  $x'=p/r$  и  $y=Y$ ,  $y'=q/r$ .

Отсюда отношение между  $p$ ,  $q$  и  $r$  определяется как:

$$r = \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{v=0}^{\infty} \left\{ (-1)^{u+v} \frac{(u+v)!}{u!(u+1)!v!(v+1)!} \left(\frac{p}{r}\right)^u \left(\frac{q}{r}\right)^v \right\} \quad (5)$$

Решение ряда (5) позволяет определить значение поправочного коэффициента  $r$ , произведение которого на максимальную разность температур в теплообменнике дает значение среднего температурного напора в перекрестноточном теплообменнике:

$$\Delta\tau = (T_{11} - T_{21}) \cdot r \quad (6)$$

где  $p$  и  $q$  – коэффициенты Смита:  $p = \frac{T_{11} - T_{12}}{T_{11} - T_{21}}$ ,  $q = \frac{T_{22} - T_{21}}{T_{11} - T_{21}}$  ( $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{22}$  – температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе и выходе соответственно).

Боуманом, Мюллером и Нагелем [4] представлены номограммы для многих часто встречающихся схем течения в конструкциях перекрестноточных теплообменников, разработка которых основана на результатах работы [2].

Такие номограммы позволяют определять поправочные коэффициенты  $F$ , произведение которых на величину среднелогарифмического температурного напора для противотока позволяют определить средний температурный напор в перекрестноточных теплообменниках.

$$\Delta\tau = \frac{(T_{11} - T_{22}) - (T_{12} - T_{21})}{\ln \left[ \frac{(T_{11} - T_{22})}{(T_{12} - T_{21})} \right]} \cdot F \quad (7)$$

$$F = f(P, R) \quad (8)$$

$$\text{где } R = \frac{T_{11} - T_{12}}{T_{22} - T_{21}}, P = \frac{T_{22} - T_{21}}{T_{11} - T_{21}}$$

При этом коэффициенты  $P$ ,  $R$  и  $F$ , введенные в работе [4], могут быть выражены через коэффициенты Смита  $p, q$  и  $r$  в виде:

$$R = (p/q), P = q, \text{ а } F = r/r_0$$

$$\text{, где } r_0 = (p - q) / \ln[(1 - q)/(1 - p)]$$

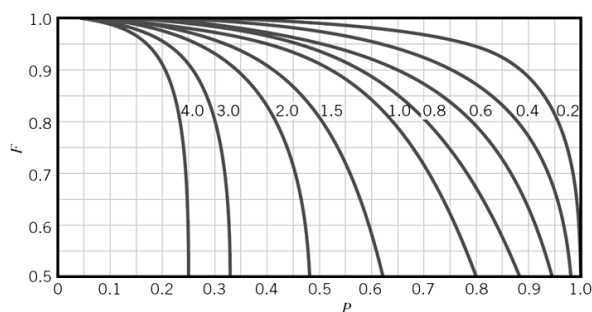


Рис. 1. Номограмма Боумана, Мюллера и Нагеля для определения поправок к среднелогарифмическому температурному напору на перекрестный ток.

В отличие от метода Смита [1] графоаналитический метод Боумана, Мюллера и Нагеля [4] получил самое широкое практическое применение.

## АНАЛИЗ МЕТОДА

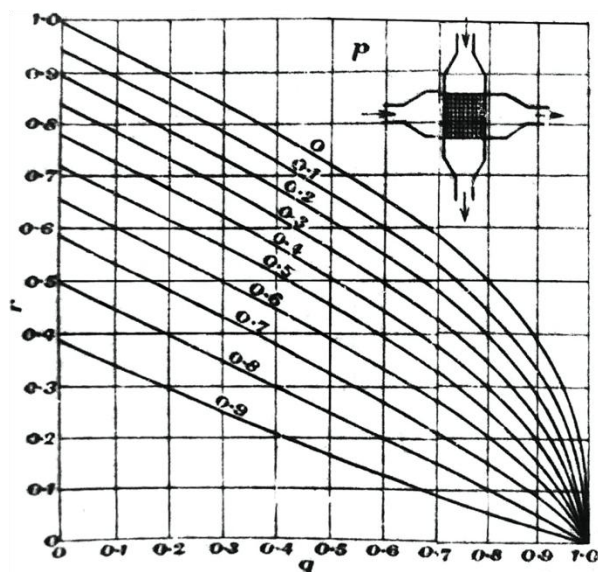


Рис. 2. Номограмма Смита, для определения поправок (одноходовой по обеим полостям теплообменный аппарат, перекрестный ток, оба теплоносителя не перемешиваются).

Принципиальным отличием метода Смита и соответствующей номограммы (Рис. 2.) от номограммы Боумана (Рис. 1.) является то, что использование номограммы Смита позволяет, не вычисляя величину среднелогарифмического температурного напора противотока, рассчитать средний температурный напор в перекрестноточном теплообменнике по выражению (6).

Согласно методу [4] вычисление значения среднелогарифмического температурного напора в случае  $R=1$  при любых  $P$  не представляется возможным, так как  $(T_{11} - T_{12}) = (T_{22} - T_{21})$ . Следовательно, необходимо учитывать, что в этом случае нужно рассчитывать величину не среднелогарифмического, а среднеарифметического температурного напора, что приводит к снижению точности вычисления поправки  $F$  для метода [4]. При использовании метода Смита для этого случая вычисление среднего температурного напора не представляет затруднений.

С целью алгоритмизировать метод [4] в работе [5] предложен метод аппроксимации и интерполяции номограмм, представленных в работе [4] путем занесения в память

ЭЦВМ нескольких тысяч текущих значений. Ввиду высокой трудоемкости и недостаточной точности этот метод не получил широкого распространения.

Дубровским Е.В. [6] представлен метод решения ряда (5) для случая:

$$q \geq 0,9 ; p \geq 0,080 \text{ и } r \geq 0,3 \quad (9)$$

при относительной погрешности  $\delta r = 10^{-4}$ .

Для уменьшения количества рассчитываемых членов ряда был использован метод кусочно-линейной аппроксимации их текущих значений. В результате для заданной погрешности  $\delta r = 10^{-4}$  было определено необходимое количество членов ряда – 16. В результате время расчета ряда (5) на ЭЦВМ серии ЕС составляло 2-5 мин., что было вполне приемлемо для конструкторского теплогидравлического расчета перекрестноточных конструкций теплообменников.

К недостаткам этого метода следует отнести ограничения (9), которые применялись для одноходовых по обеим полостям перекрестноточных конструкций теплообменников при использовании их для экспериментальных теплогидравлических исследований теплообменных поверхностей.

Для более точных результатов определения  $r$  было необходимо оптимизировать многоитерационный расчет, увеличить расчетное количество членов ряда и использовать ЭВМ повышенной мощности для расчета элементов ряда, для которых, при повышении числа сумм членов ряда, необходимо рассчитывать параметры ряда, значения которых превышают  $10^{15}$ .

Возможности современных ЭВМ несоизмеримо возросли в сравнении с ЭЦВМ серии ЕС, что позволяет решить задачу более точного расчета. Поэтому целью настоящей работы являлась разработка программы расчета среднего температурного напора по методу Смита в одноходовом по обеим полостям перекрестно-точном теплообменнике с неперемишивающимися теплоносителями для случаев  $0 < q < 0,9; 0 < p < 0,9$  и  $0,1 < r < 1$  при задаваемой погрешности  $\delta r = \{[f(r) - r]/r\}$ .

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ МЕТОДА

Для решения задачи оптимизации и достижения задаваемой точности расчета была разработана программа, позволяющая подставлять начальные и конечные температуры и вычислять средний температурный напор с учетом поправки на перекрестный ток по методу Смита. При этом выводятся все элементы расчета поправок по методам Смита и Боумана, а также величина среднелогарифмического температурного напора для противотока с последующим выводом результатов расчета значений среднего температурного напора для каждого из методов.

Проведение численного эксперимента позволило определить зоны удовлетворительной сходимости ряда при расчете  $\mathbf{r}$  с заданной погрешностью  $\delta\mathbf{r}$  при определенном числе членов ряда, а также определить достаточное число членов ряда для каждой из этих зон. Были произведены расчеты поправок по методу Смита для зон  $(p+q)\leq 1$  при  $p\leq 0,5$  и  $q\leq 0,5$  и  $(p+q)\geq 1$  при числах членов ряда  $N : 5, 10, 25, 50, 75$ . Время расчета фиксировалось. В результате анализа полученных данных численного эксперимента было выяснено, что для случаев  $(p+q)\leq 1$  при заданной погрешности  $\delta\mathbf{r}$  достаточно рассчитывать 25 членов ряда, так как погрешность вычислений поправки при расчете 50 и более членов ряда не изменяется, но при этом затрачивается большее время расчета. При расчете 25 членов ряда в этой зоне время расчета поправки занимает приблизительно 5 секунд.

Для случаев  $(p+q)\geq 1$  необходимо рассчитывать не менее 75 членов ряда для достижения заданной точности вычислений поправки, так как в этой зоне ряд сходится медленнее. При расчете 75 членов ряда в этой зоне время расчета поправки занимает от 1 до 10 минут.

Применение различных численных методов для расчета ряда (5) при исследовании не привело к повышению точности и уменьшению времени расчета.

Все расчеты и вычисления были произведены на персональном компьютере на базе AMD Athlon™ X2 Dual-Core QL-62.

Для подтверждения выбранного метода расчета двойного бесконечного ряда была построена аналогичная работе [1] номограмма (Рис. 3.).

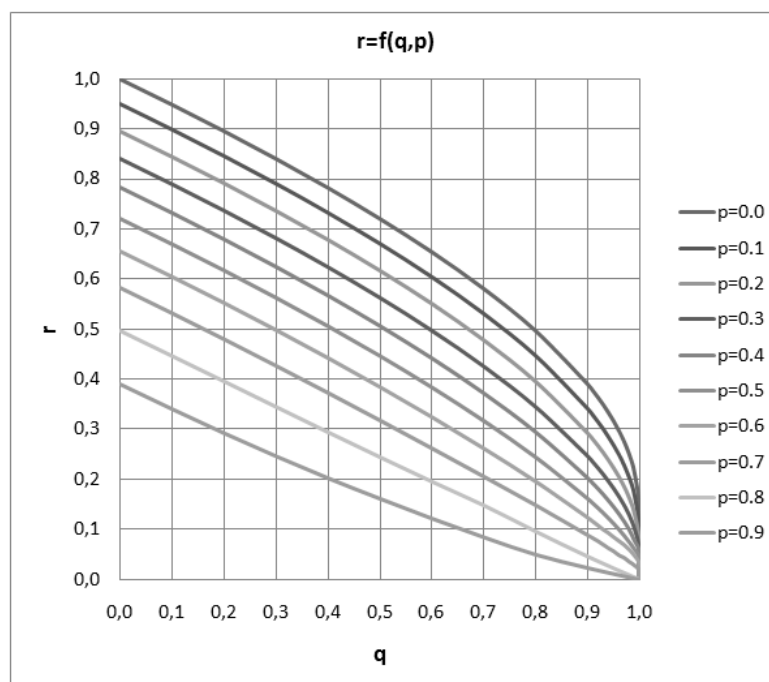


Рис. 3. Рассчитанная номограмма для определения поправок к среднелогарифмическому температурному напору (одноходовой теплообменный аппарат, перекрестный ток, оба теплоносителя не перемешиваются)

Программа расчета среднего температурного напора перекрестного тока (Рис. 4) разработана в кроссплатформенном, кроссбраузерном самостоятельном скриптовом server-side языке программирования PHP (Hypertext Preprocessor), что позволяет разместить листинг программы на любом ЭВМ-сервере в локальной сети или сети Internet для возможности доступа к интерфейсу программы из любой точки планеты. Для работы программы необходим стандартный набор программного обеспечения HTTP сервера – Apache, PHP, MySQL.

Как дополнительный способ оптимизации была продумана система сохранения и загрузки результатов расчета в зависимости от имеющихся в MySQL базе данных, что позволяет ускорить процесс вывода необходимых данных без повторного расчета.

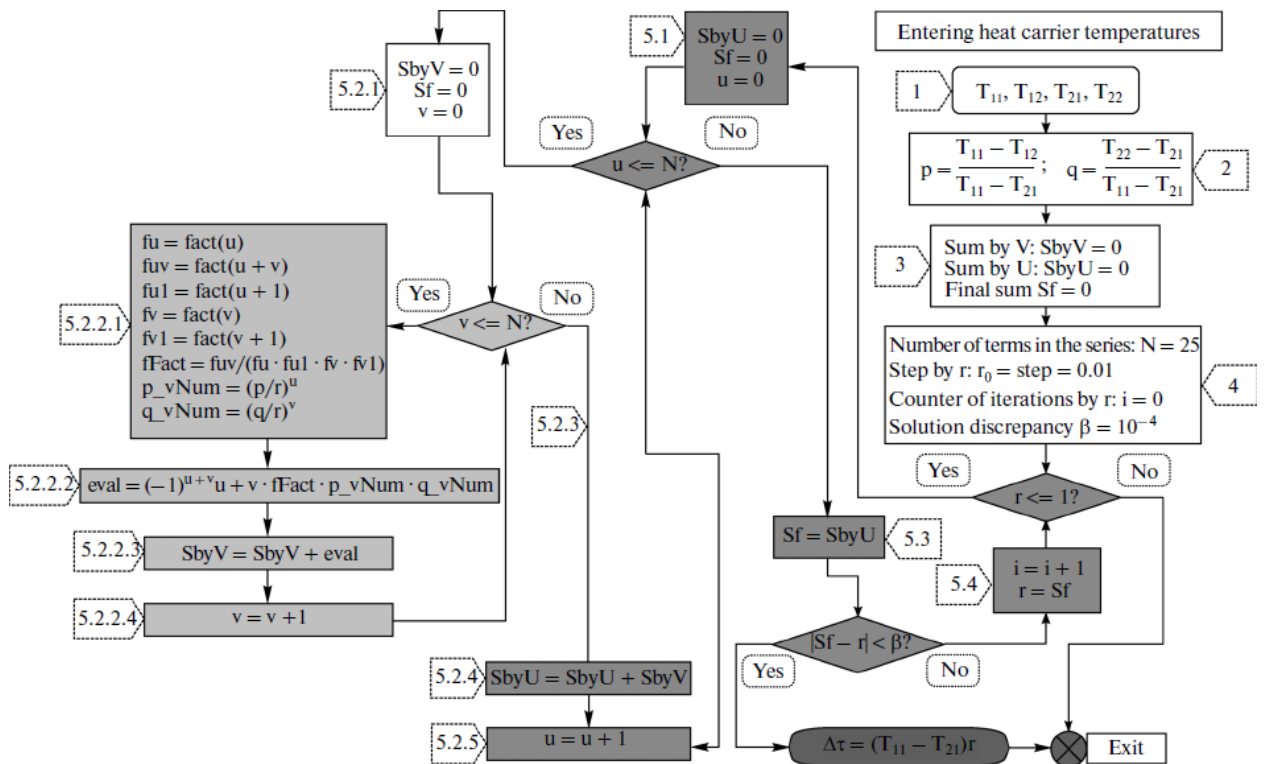


Рис. 4. Алгоритм программы расчета величины среднего температурного напора при перекрестном токе с неперемешивающимися средами.

## ВЫВОДЫ

1. В инженерной практике достигнута минимальная погрешность измерения температур  $\pm 0.02$  °C [7], которая требует определения расчетного значения поправки Смита  $r$  с точностью не более чем  $10^{-4}$ , что невозможно обеспечить при использовании графоаналитического метода. При такой величине погрешности расчет двойного бесконечного ряда не представляет трудности.

2. Разработан алгоритм и реализующая его программа для высокоточного вычисления поправки и среднего температурного напора в одноходовом по обеим полостям перекрестно-точном теплообменнике с неперемешивающимися средами по методу Смита, что обеспечило разработку программ расчета таких конструкций теплообменников.

3. Преимущество расчетного метода над графоаналитическим очевидно при необходимости вычисления значения величины среднего температурного напора перекрестного тока с погрешностью не более чем  $10^{-4}$ .

4. Метод, предложенный Смитом, в отличие от метода Боумана, Мюллера и Нагеля позволяет вычислять значение величины среднего температурного напора перекрестного тока для случаев  $(T_{11} - T_{12}) = (T_{22} - T_{21})$ .



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Smith D.M.** Mean Temperature Difference in Cross Flow // Engineering. - 1931. - Vol. 138. - P. 479-481.
2. **Nusselt W.** Der Wärmeübergang im Kreuzstrom // Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieur. - 1911. - Vol. 55. - P. 2021-2024.
3. **Nusselt W.** Eine neue Formel für den Wärmedurchgang im Kreuzstrom // Zeitschrift Technische Mechanik und Thermodynamik. - 1930. - Vol. 1. - P. 417-422.
4. **Bowman R.A.** Mean Temperature Difference in Design / R.A. Bowman, A.C. Mueller, W.M. Nagle // Transactions of ASME. - 1940. - Vol. 62. - P. 283-294.
5. **Бажан П.И.** Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. - М. - Машиностроение. - 1989. - 368 с.
6. **Дубровский Е.В.** Расчет среднего температурного напора в перекрестноточном теплообменнике / Е.В. Дубровский, Ю.В. Гаврилов, Б.И. Васильев // Теплообменные аппараты газотурбинных двигателей, Труды ЦИАМ. – 1977. - №750. - С. 122-126.
7. **Воронин Г.И.** Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2 / Г.И. Воронин, Г.А. Дрейцер, Э.К. Калинин и др. – Вильнюс. – Москлас. – 1988. – 188 с.

### Сведения об авторах:

Флейтлих Б.Б., аспирант Московского авиационного института (технического государственного университета);

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4;

тел.:(499)158-4744; e-mail: [bfl@nm.ru](mailto:bfl@nm.ru) , тел.:(499)158-4744

