

УДК 621.01

Анипко О.Б., Бабич Н.И.

**КРИТЕРИАЛЬНО-СТРУКТУРНЫЙ МЕТОД И ОСОБЕННОСТИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА
ДЛЯ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ**

В общем алгоритме расчета ТА ключевое место отводится информации об интенсивности теплоотдачи для выбранной формы теплопередающей поверхности. Традиционно интенсивность теплоотдачи при вынужденной конвекции представляют либо в виде критериального уравнения

$$Nu = cRe^n Pr^m Cr^k \epsilon_t, \quad (1)$$

в котором в зависимости от условий протекания процесса константы c , n , m , k получают на основе экспериментальных данных, либо в виде зависимости для коэффициента теплопередачи

$$K = c(\gamma V_L)^n V_w^q, \quad (2)$$

где (γV_L) – массовая скорость одного теплоносителя, V_w – линейная скорость другого теплоносителя, а константы c , n , q также получают на основе обработки экспериментальных данных.

Таким образом, с одной стороны сама форма представления информации ограничивает возможность введения дополнительных параметров, что будет приводить к техническому усложнению методики эксперимента. С другой стороны, как правило, ряд факторов, как например влияние теплофизических свойств теплоносителя, включают в полученную зависимость без проверки достоверности имеющейся информации для условий эксперимента. Кроме того, получение зависимостей (1), (2) осуществляется, как правило, в лабораторных условиях с моделями, имеющими чистую поверхность и использованием чистых теплоносителей, что **apriori** исключает возможность учесть условия эксплуатации поверхности в реальных условиях.

Кроме того, при вариантном проектировании целевые функции могут включать параметры, которые не входят в безразмерные критерии уравнения (1), что вообще исключает возможность прямо использовать это уравнение в задачах принятия решения.

Как видно, выражение (1) включает три безразмерные группы – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля. Основная задача при обработке экспериментальных данных сводится к определению показателей степени этих чисел и постоянной C . Эта задача может быть решена на основе теоретического анализа процесса теплоотдачи, или экспериментально.

Теоретический анализ может быть применен для поверхностей простой формы, поле скорости которых известно. Так, для установившегося турбулентного течения в гладких круглых трубах коэффициент теплоотдачи увеличивается несколько медленнее с ростом числа Рейнольдса, чем по линейному закону. Это приводит к выводу о том, что показатель степени числа Рейнольдса меньше единицы. Анализ структуры потока показывает, что поперечные составляющие скорости, обусловленные турбулентностью,

увеличиваются с повышением скорости не линейно, а менее интенсивно. Поскольку теплоперенос через пограничный слой определяется процессом турбулентного смешения, как и обмен количеством движения, определяющий коэффициент трения, который пропорционален числу Рейнольдса в степени 0,2, можно заключить, что коэффициент теплоотдачи пропорционален числу Рейнольдса в степени 0,8.

Следует особо подчеркнуть, что оценить влияние числа Прандтля гораздо труднее. Это связано с тем, что удельная теплоемкость и теплопроводность теплоносителя, как правило, слабо изменяются с изменением температуры. При этом вязкость, особенно жидкости, изменяется довольно существенно. С изменением вязкости по толщине пограничного слоя меняется и распределение скорости. Поскольку вязкость жидкости уменьшается с ростом температуры, то при нагревании пограничный слой уменьшается, а теплоотдача увеличивается. При охлаждении жидкости наблюдается обратная картина. Поэтому при обработке экспериментальных данных часто показатель степени принимают равным 0,4 или 0,3 (для процессов охлаждения жидкости) и таким образом, задача сводится к отысканию лишь коэффициента C и показателя степени числа Рейнольдса.

Отметим, что для газов вязкость возрастает с увеличением температуры, поэтому изменения толщины пограничного слоя в газах с изменением температуры будут противоположными изменениям в жидкостях. При небольших температурах, поскольку для газов число Прандтля близко к единице, влиянием температуры можно пренебречь. Однако при разности температур в 800 К и более, отличие коэффициента теплоотдачи от расчетного значения, полученного по критериальному уравнению с принятым значением показателя степени числа Прандтля может достигать 30 % и более, что связано с существенным изменением физических свойств по толщине пограничного слоя.

В связи с этим возникает необходимость в разработке метода получения аналитических выражений для интенсивности теплоотдачи, в структуру которых можно включать любое количество параметров, чувствительных к изменению значения функции. Для этого разработан метод, который назван критериально-структурным методом – КСМ.

Основу разработанного метода составляют следующие положения:

1. для заданных условий процесс описывается критериальным уравнением с заданной структурой, учитывающей требуемые параметры;
2. рассматривается установившийся процесс, который является эргодическим, то есть среднестатистическое значение наблюдаемых параметров равно среднему значению по времени.

Рассмотрим систему, в которой происходит процесс теплообмена, состояние которой определяется одним наблюдаемым параметром, тогда структуру критериального уравнения представим в виде:

$$Nu = c Re^n. \quad (3)$$

В результате проведения экспериментов могут быть определены Nu и Re . Однако, в уравнении (3) при известных значениях Nu и Re имеем два неизвестных c и n . Таким образом однократного определения Nu и Re по результатам экспериментов недостаточно. Для определения искомых величин необходима система уравнений вида:

$$\begin{cases} Nu_1 = c Re_1^n; \\ Nu_2 = c Re_2^n. \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) может быть решена алгебраическими методами, в результате чего будут получены значения c и n в виде

$$n = \frac{A_{N_1} - A_{N_2}}{A_{R_1} - A_{R_2}}; \quad (5)$$

$$c = \exp(A_{N_1} - nA_{R_1}), \quad (6)$$

где A_{N_i} и A_{R_i} – соответственно логарифмы чисел Nu_i и Re_i .

Если система характеризуется двумя наблюдаемыми параметрами, то интенсивность теплоотдачи может быть описана уравнением

$$Nu = c Re^n Pr^m, \quad (7)$$

для которого может быть применена аналогичная процедура определения численных значений c , n и m .

Число наблюдаемых параметров $N = 2$, а количество искомым констант $K = 3$, для их определения необходима следующая система уравнений

$$\begin{cases} Nu_1 = c Re_1^n Pr_1^m; \\ Nu_2 = c Re_2^n Pr_2^m; \\ Nu_3 = c Re_3^n Pr_3^m. \end{cases} \quad (8)$$

Решения системы (8) могут быть найдены из следующих выражений

$$m = \frac{A_{N_2} - A_{N_3}}{(A_{P_2} - A_{P_3}) + \frac{(A_{P_2} - A_{P_1}) - A_{N_2} + A_{N_1}}{A_{R_1} - A_{R_2}} (A_{R_2} - A_{R_3})}; \quad (9)$$

$$n = \frac{m \cdot (A_{P_2} - A_{P_1}) - A_{N_2} + A_{N_1}}{A_{R_1} - A_{R_2}}; \quad (10)$$

$$c = \exp \left[\frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^3 A_{N_i} - m \sum_{i=1}^3 A_{P_i} - n \sum_{i=1}^3 A_{R_i} \right) \right]. \quad (11)$$

В общем случае число необходимых уравнений в системе должно быть равно количеству искомым констант, и таким образом, для структуры вида (1) должно выполняться условие $K = N + 1$. Следует отметить, что при введении трех и более наблюдаемых параметров получаемая система уравнений кроме приведенного метода может быть решена путем преобразования к трансцендентному уравнению с последующим разложением коэффициентов этого уравнения в ряд или с применением метода касательных.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о значениях величин, получаемых на основе обработки экспериментальных данных Nu , Re , Pr и других безразмерных комплексов, которые могут быть включены в структуру уравнения. Сложность этого во-

проса заключається в тому, що в відповідності з положенням розробаного КСМ ці комплекси зв'язані між собою рівнянням виду

$$Nu = f(Re, Pr, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots \Gamma_n), \quad (12)$$

і поэтому погрешности и ошибки в определении численного значения одного из них будут приводить к искажению констант всего уравнения. Поскольку состояние системы, которое характеризуется параметрами Nu_i , Re_i и Pr_i можно рассматривать как реализацию случайного процесса, то для минимизации влияния погрешностей при экспериментальном определении этих величин следует использовать методы планирования экспериментов [2].

При этом следует учитывать, что если предлагаемый метод применяется для обработки экспериментов, проведенных на физических моделях или натуральных образцах, уровень значимости по критерию Nu следует задавать равным 0.05, что соответствует доверительной вероятности 0.95, а при анализе численных экспериментов, учитывая отсутствие погрешностей, за исключением обусловленных закруглением модели, уровень значимости по Nu следует задавать порядка 0.01, что соответствует доверительной вероятности 0.99.

Следует отметить, что разработанный критериально-структурный метод обладает достаточно большой степенью общности и может применяться не только к выявлению зависимостей интенсивности теплоотдачи от перечисленных параметров, а также и для получения таких зависимостей от геометрических параметров теплообменной поверхности, отношения характерных температур, и других требуемых в вариантном проектировании параметров процесса, практически без ограничения их количества.

Литература

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с нем. Наука, М., 1969. с. 742.
2. Рабинович С.Г. Погрешности измерений.– Л., Энергия.– 1978.– 262 с.

УДК 621.01

Аніпко О.Б., Бабіч М.І.

КРИТЕРІАЛЬНО-СТРУКТУРНИЙ МЕТОД ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ДЛЯ КРИТЕРІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ

Наведено основні положення критериально-структурного методу щодо отримання критериальних рівнянь тепловіддачі на основі експериментальних досліджень. Визначено вимоги щодо рівня значущості чинників.

Anipko O., Babich N.

CRITERIA-STRUCTURE METHOD AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION HEAT TRANSFER ESPECIALLY FOR THE CRITERIA EQUATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER