УДК 358.119

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ОПИСАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ В КРИТЕРИАЛЬНОМ ВИДЕ

д.т.н., проф. О.Б. Анипко

Представлен метод обработки экспериментальных данных об интенсивности теплоотдачи в критериальном виде для решения задачи вариантного проектирования контактных теплообменников.

В общем алгоритме расчета теплового агрегата ключевое место отводится информации об интенсивности теплоотдачи для выбранной формы теплопередающей поверхности. Традиционно интенсивность конвективной теплоотдачи представляют в виде критериального уравнения

$$\mathbf{Nu = c \cdot Re^{n} \cdot Pr^{m} \cdot Cr^{k} \cdot \varepsilon_t}\,, \tag{1}$$

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

$$\mathbf{K = c(\gamma V_L)^{m} V_w^{q}}\,, \tag{2}$$

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 в лабораторных условиях с моделями имеющими чистую поверхность и использованием чистых теплоносителей, что априори 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.

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 новый 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, т.е. среднестатистическое значение наблюдаемых параметров равно среднему значению по времени.

Рассмотрим систему, в которой происходит процесс теплообмена, а состояние определяется одним наблюдаемым параметром. Тогда структуру критериального уравнения представим в виде

$$\mathbf{Nu} = \mathbf{c}\,\mathbf{Re}^{\mathbf{n}}. \tag{3}$$

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

$$\begin{cases} \mathbf{Nu}_1 = \mathbf{c}\,\mathbf{Re}_1^{\mathbf{n}}; \\ \mathbf{Nu}_2 = \mathbf{c}\,\mathbf{Re}_2^{\mathbf{n}}. \end{cases} \tag{4}$$

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

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{A}_{\mathbf{N}_1} - \mathbf{A}_{\mathbf{N}_2}}{\mathbf{A}_{\mathbf{R}_1} - \mathbf{A}_{\mathbf{R}_2}}\ ; \tag{5}$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{exp}\left(\mathbf{A}_{\mathbf{N}_1} - \mathbf{n}\mathbf{A}_{\mathbf{R}_1}\right), \tag{6}$$

где $\mathbf{A}_{\mathbf{N}_\mathbf{i}}$ и $\mathbf{A}_{\mathbf{R}_\mathbf{i}}$ - соответственно логарифмы чисел $\mathbf{Nu}_\mathbf{i}$ и $\mathbf{Re}_\mathbf{i}$.

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

$$\mathbf{Nu} = \mathbf{c}\,\mathbf{Re}^{\mathbf{n}}\ \mathbf{Pr}^{\mathbf{m}}\ , \tag{7}$$

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

Число наблюдаемых параметров **N = 2**, а количество искомых констант **K = 3**. Для их определения необходима следующая система уравнений

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

Решения системы (8) могут быть найдены из следующих выражений:

$$\mathbf{m} = \frac{A_{N_2} - A_{N_3}}{(A_{p_2} - A_{p_3}) + \dfrac{(A_{p_2} - A_{p_1}) - A_{N_2} + A_{N_1}}{A_{R_1} - A_{R_2}}(A_{R_2} - A_{R_3})}; \tag{9}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{m}\cdot(A_{p_2} - A_{p_1}) - A_{N_2} + A_{N_1}}{A_{R_1} - A_{R_2}}; \tag{10}$$

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

В общем случае число необходимых уравнений в системе должно быть равно количеству искомых 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 $\mathbf{\Gamma_i}$, которые могут быть включены в структуру уравнения. Сложность этого вопроса заключается в том, что в соответствии с положением разработанного КСМ эти комплексы связаны между собой уравнением вида

$$\mathbf{Nu = f(Re, Pr, \Gamma_1, \Gamma_2 \ldots \Gamma_n)} \tag{12}$$

и поэтому погрешности в определении численного значения одного из них будут приводить к искажению констант всего уравнения. Поскольку состояние системы, которое характеризуется параметрами $\mathbf{Nu_i}$, $\mathbf{Re_i}$ и $\mathbf{Pr_i}$ можно рассматривать как реализацию случайного процесса, то для минимизации влияния погрешностей при экспериментальном определении этих величин следует использовать методы планирования имитационных экспериментов [1]. При этом следует учитывать, что если предлагаемый метод применяется для обработки экспериментов, проведенных на физических моделях или натурных образцах, то уровень значимости по критерию **Nu** следует задавать равным 0.05. Это соответствует доверительной вероятности 0.95. При анализе численных экспериментов, учитывая отсутствие погрешностей, за исключением обусловленных загрублением 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, но 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. По своему методологическому подходу разработанный КСМ представляется универсальным не только для описания процессов теплообмена, но и любых других процессов, где можно выделить требуемые параметры системы и связать их между собой структурой искомого уравнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

Поступила в редколлегию 20.10.2000