

И.М.Приходько, д.т.н.,
 Э.Б.Филиппов, к.т.н.,
 Г.Б.Черепенников, к.т.н.,
 И.Б.Амсенко, аспирант

О РАСЧЕТАХ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Широкое использование теплообменных устройств обусловили необходимость оценки теплового состояния поверхностей нагрева.

На протяжении многих лет подобные задачи решались методами доводки и поэтапного совершенствования конкретных конструкций теплообменного оборудования в ходе его опытно-промышленной эксплуатации. Хотя такой путь исследований и приводит к искомому результату, он сопряжен с большими затратами времени и средств, а получаемая информация не поддается обобщениям и не может быть использована при разработке новых типов оребренных поверхностей нагрева.

Сложившаяся практика не могла не сказаться на развитии методов исследования и расчета теплового состояния поверхностей нагрева с поперечно-лепестковым оребрением. Так, в основе ныне применяемых расчетных методик [1,2] лежит принятый в качестве нормативного метод аналитического расчета трубчатых поверхностей нагрева с кольцевым оребрением [3], который в силу принятых допущений по сути дела является оценочным.

С другой стороны, разрабатываемые в последнее время методики численного исследования температурных полей сложно оребренных поверхностей нагрева, базирующиеся на конечно-элементном подходе к построению сеточного аналога исходной физической модели, отличаются высокой сложностью и стоимостью вследствие необходимости привлечения квалифицированных специалистов не только на этапе разработки и отладки программы, но и на этапе ее практического использования.

Но, как показывает анализ информации, полученной в ходе экспериментальных исследований и опытно-конструкторской отработки теплообменного оборудования, имеется принципиальная возможность создания относительно простой, но эффективной методики теплового расчета поверхности нагрева с поперечно-лепестковым оребрением при соблюдении определенных подходов к построению вычислительных алгоритмов и программ.

Прежде всего, это принцип, согласно которому модель исследуемого процесса и метод ее анализа в совокупности должны обеспечивать получение приемлемого по точности результата при минимальных затратах.

Это предполагает поиск компромисса между двумя противоречащими друг другу требованиями, которые могут быть сформулированы следующим образом:

- модель должна быть настолько простой, чтобы ее анализ мог быть выполнен по возможности наиболее простым способом;
- упрощение модели не должно приводить к погрешностям, превосходящим допустимые.

При таком подходе задача формирования модели (физической и/или математической) состоит не столько в том, чтобы добиться максимального соответствия исследуемому процессу, сколько в выявлении и учете только тех особенностей процесса, которые оказывают на него определяющее влияние.

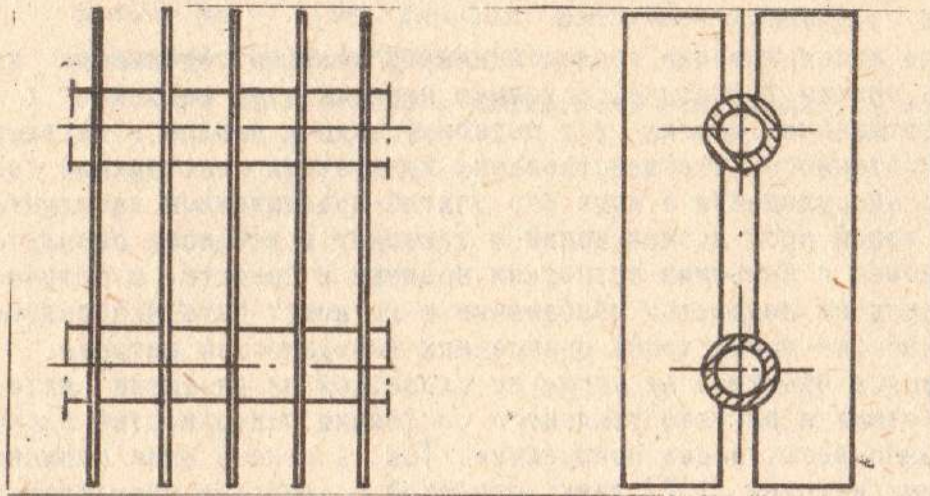


рис.1 Схема поверхности нагрева с поперечно-лепестковым оребрением

С этой целью авторами был проведен ряд предварительных исследований теплообмена рассматриваемой поверхности нагрева (рис.1) с газовым потоком и теплоносителем на упрощенной модели, предусматривающей переход к одиночной трубе с кольцевым оребрением и анализу ее теплового состояния. Возможность такого подхода была обоснована в [1]. Двухтрубная поверхность нагрева с поперечно-лепестковым оребрением заменяется двумя трубчатыми элементами с кольцевыми ребрами той же толщины, при этом площади кольцевых ребер равны площадям плоских ребер-лепестков. Следует отметить, что в данном случае кольцевые ребра приняты цельными, а не в виде двух лепестков-секторов, как это предложено в [1]. Процесс теплообмена такого элемента с греющей и теплопринимающей средами полагается симметричным относительно оси трубы и срединной плоскости ребра. Описывается он следующей системой уравнений:

$$\text{труба} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0, T = T(z, r), z \in [R_1, R_2], r \in [0, \frac{1}{2}]; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0, r=\frac{1}{2}} = 0; \quad \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R_1} = \alpha_x (T_x - T(R_1, z)); \quad (1.2), (1.3)$$

$$\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R_2} = \begin{cases} q_c, & 0 \leq z \leq \frac{\delta}{2}; \\ \lambda_r (T_n - T(R_2, z)), & \frac{\delta}{2} < z \leq \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\text{ребро (тонкое в тепловом отношении тело) -} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{q(z)}{\lambda_P} = 0, T = T(z), z \in [R_2, R_P], \quad (1.5)$$

$$\lambda_P \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R_2} = q_c, \quad \lambda_P \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=R_P} = \lambda_P (T_n - T(R_P)); \quad (1.6), (1.7)$$

$$q(z) = \lambda_P (T_n - T(z)). \quad (1.8)$$

Обозначение:

- f - шаг ребер;
 δ - толщина ребра;
 T_*, T_n - температура соответственно жидкости (тепловоспринимающей среды) и газового потока;
 $\alpha_{ж, \alpha_r, \alpha_p}$ - коэффициент теплоотдачи соответственно трубы и жидкости к газовому потоку и ребра к газовому потоку;
 λ_r, λ_p - теплопроводность материала трубы и ребра;
 q_c - тепловой поток на границе контакта ребра и трубы.

В отличие от [1] в настоящем исследовании было признано целесообразным использовать для анализа этой промежуточной модели численные методы, предварительно построив ее сеточный аналог. Это позволило, во-первых, представить трубу и ребро как единое целое, а, во-вторых, рассмотреть задачу теплообмена поверхности нагрева с газовым потоком и жидкостью в сопряженной постановке, дополнив математическое описание модели (1.1) - (1.8) уравнениями баланса теплоты обеих сред.

Анализ теплового состояния модели проводился в следующей последовательности:

- рассчитывалось температурное поле модели как совокупность значений температур в узловых точках сетки-аналога;
- используя найденное температурное поле, заданные значения температур сред и коэффициентов теплоотдачи, вычислялся баланс теплоты для газового потока и жидкости и определялось изменение их температуры в пределах модели;
- расчет температурного поля проводился повторно, но при этом температуры сред принимались равными их средним значениям (относительно температур на входе и на выходе модели).

В результате проведенных по разработанной программе предварительных исследований теплового состояния модели поверхности нагрева в предполагаемых условиях ее эксплуатации было установлено:

- изменение температуры тепловоспринимающей среды в пределах трубчатого элемента модели составляет менее 1°C при температуре на входе $80 \dots 100^\circ\text{C}$, что позволяет принять допущение о ее постоянстве;
- изменение значений коэффициентов теплоотдачи на $5 \dots 10\%$ не приводит к существенному изменению температурного поля оребрения;
- изменение температуры газового потока в пределах элемента может достигать нескольких десятков градусов.

Первые два вывода совпадают со сделанными при экспериментальных исследованиях поперечно-лепесткового оребрения [1]. Третий вывод свидетельствует о том, что при расчете лепесткового оребрения изменение температуры газового потока вдоль ребра-лепестка желательно учитывать.

Еще один результат предварительного исследования заслуживает внимания. Расчет показал, что температурные градиенты в кольцевом ребре, эквивалентном по площади лепестковому, достигают $12 \dots 15^\circ\text{C}$ на миллиметр в зоне его контакта с трубой и $3 \dots 5^\circ\text{C}$ на миллиметр

на периферии ребра. Можно предположить, что в прямоугольном ребре-лепестке температурные градиенты в радиальном направлении к центру трубы будут в несколько раз выше, чем на периферии ребра вдоль внешней его границы (за исключением угловых зон).

Иначе говоря, можно сделать вывод о том, что в формировании теплового режима лепесткового оребрения определяющую роль играет именно теплоперенос в радиальном направлении, перетоки же теплоты по угловой координате относительно центра труб играют второстепенную роль. Сходный результат получен и в [1]. Сделанный вывод представляется принципиально важным, поскольку именно он создает предпосылку для такого упрощения модели поверхности нагрева с поперечно-лепестковым оребрением, когда для ее анализа могут быть использованы численные методы в форме достаточно простых, экономических алгоритмов без существенного снижения точности искомого результата.

Возможности предложенной модели и реализующей ее программы иллюстрируются на примере расчета температурного поля фрагмента поверхности нагрева, ранее выполненного методом конечных элементов в ЦКТИ. Размеры и теплотехнические характеристики трубы и ребра лепестка, характеристики теплообмена с газовым потоком и теплопринимающей средой в обоих случаях расчета идентичны. В частности, температура газа равна 600°C , коэффициент теплоотдачи ребра и трубы к газовому потоку $83,2 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, температура теплопринимающей среды 300°C , коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности трубы $1 \cdot 10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Сопоставительный анализ показал, что расхождения между полученными результатами не превышают 6%. Что касается трубчатого элемента, то осредненные по угловой координате значения температур в первом варианте расчета равны 335°C в зоне контакта с ребром, 309°C в средней по высоте зоне, 304°C у верхней границы элемента и отличались от соответствующих значений температур второго варианта расчета не более, чем на 1%.

Наконец, необходимо отметить, что длительность вычислительного процесса на ЭВМ типа IBM PC AT составила порядка секунды.

Таким образом, можно констатировать, что разработанные модель и программа, несмотря на очевидную простоту, обеспечивают приемлемую точность конечного результата и могут быть рекомендованы для проведения оптимизационных расчетов характеристик трубчатых поверхностей нагрева с поперечно-лепестковым оребрением при проектировании теплообменного оборудования, а также для численного исследования процессов теплообмена оребренных поверхностей.

Список использованных источников

1. Левченко Г.И., Лисейкин И.Д и др. Оребренные поверхности паровых котлов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 166 с.
2. Оребренные поверхности нагрева в теплообменном оборудовании. - М.: НИИинформтяжмаш, 1975. - 40 с.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов /Нормативный метод/ - М.: Энергия, 1973. - 296 с.