

Окончание таблицы

| 1                                                                        | 2                                       | 3                        |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| $x_2, x_4, x_5$                                                          | $D_2 D_4 D_5 \bar{x}_{245}^2$           | $3,311 \cdot 10^{-5}$    |
| $x_3, x_4, x_5$                                                          | $D_3 D_4 D_5 \bar{x}_{345}^2$           | $3,685 \cdot 10^{-5}$    |
| Взвешенные дисперсии по четырем элементам системы:                       |                                         |                          |
| $x_1, x_2, x_3, x_4$                                                     | $D_1 D_2 D_3 D_4 \bar{x}_{1234}^2$      | $5,581 \cdot 10^{-5}$    |
| $x_1, x_2, x_3, x_5$                                                     | $D_1 D_2 D_3 D_5 \bar{x}_{1235}^2$      | $1,3384 \cdot 10^{-4}$   |
| $x_1, x_3, x_4, x_5$                                                     | $D_1 D_3 D_4 D_5 \bar{x}_{1345}^2$      | $1,766 \cdot 10^{-5}$    |
| $x_1, x_2, x_4, x_5$                                                     | $D_1 D_2 D_4 D_5 \bar{x}_{1245}^2$      | $3,016 \cdot 10^{-5}$    |
| $x_2, x_3, x_4, x_5$                                                     | $D_2 D_3 D_4 D_5 \bar{x}_{2345}^2$      | $5,581 \cdot 10^{-5}$    |
| Взвешенная дисперсия по пяти элементам системы $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ | $D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 \bar{x}_{12345}^2$ | $3,140 \cdot 10^{-5}$    |
| Сумма взвешенных дисперсий, вычисленная на основе выражения (1)          | $D_c$                                   | $2,933963 \cdot 10^{-2}$ |

В качестве кратких пояснений полученных результатов отметим следующее:

как и следовало ожидать, неопределенность системы, рассчитанная разными способами, равна и контрольная разность равна нулю;

дисперсии первого и пятого элемента равны, в то же время взвешенная дисперсия первого элемента почти в 50 раз больше пятого элемента, и это объясняется тем, что весовой коэффициент пятого элемента, характеризующий его важность в структуре, существенно меньше первого;

суммарные дисперсии по первому и второму элементу составляют более 50% неопределенности состояния системы. Интересно отметить следующее: примем в качестве предположения, что в результате технического диагностирования все потенциальные отказы первого и второго элементов будут обнаружены и устранены в период технического обслуживания и ремонта, т.е. вероятность безотказной работы первого и второго элементов равна 1. В этом случае взвешенная дисперсия пятого элемента станет равной нулю, т.е. перемычка в составе системы не будет вносить неопределенность в состояние системы и ее необходимость в этом случае будет обоснована только интересами живучести данной технической системы.

В заключение необходимо еще раз отметить, что наличие в математических моделях технико-экономического эффекта показателей неопределенности устанавливает некоторую логическую последовательность целей и задач технической диагностики, поскольку техническое диагностирование как процесс определения технического состояния объекта с заданной точностью направлено прежде всего на уменьшение неопределенности состояния объекта. Приведенные результаты являются составной частью общего решения задачи построения математических моделей расчета технико-экономического эффекта от внедрения средств технического диагностирования не только АЭС, но и сложных технических объектов разного назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В.И. Приоритетные направления внедрения диагностического обеспечения на АЭС. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 4, с. 311—313.
2. Клар Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990.
3. Weaver W. Science and complexity. — American Sci., 1968, v. 36, p. 536—544.
4. Ширяев А.Н. Вероятность. М.: Наука, 1989, с. 45.

Поступило в Редакцию 5.01.01

УДК 536.248.2

#### ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ О КРИЗИСЕ КИПЕНИЯ ВОДЫ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Ивашкевич А.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

Для теплогидравлических расчетов парогенерирующих кольцевых каналов необходимо знать критический тепловой поток  $q_{кр}$ . В работе [1] предложена эмпирическая формула для расчета  $q_{кр}$  при вынужденном течении воды в кольцевых каналах. Цель настоящей работы — предложить физически обоснованную формулу.

В работе [2] была предложена модель кризиса кипения воды в каналах. Для кольцевых каналов упрощенное уравнение кризиса имеет вид

$$x_{кр} = -(B_1 q_{кр})/(\rho w r) + B_2, \quad (1)$$

где

$$B_1 = (8Re^{0.4})/(a_2 k_1); B_2 = v + (1 - v)b_{20};$$

$$b_{20} = [(1 + d_1/d_2)/(1 + B_4) + B_4]^{-1}; B_4 = a_1 We Re^{-0.75};$$

$$k_1 = 1 + \exp(-y); y = (-x_{вх} \rho w r)/(B_1 q_{кр}) = a_2/(8Re^{0.4})[4DL_o - (\rho w r x_{кр})/q_{кр}];$$

$$Re = [\rho w (d_2 - d_1)]/\mu'; We = [v'(d_2 - d_1)(\rho w)^2]/\sigma;$$

$$L_o = l_o/(d_2 - d_1); D = d_1/(d_1 + d_2); v = v'/v'';$$

$\rho w$  — массовая скорость;  $x_{кр}$  — относительная энтальпия в сечении кризиса (на выходе из канала);  $d_1$ ,  $d_2$  — внутренний и наружный диаметр;  $d_1$  — обогреваемый диаметр кольцевого канала;  $l_o$  — обогреваемая длина;  $r$  — теплота парообразования;  $v'$ ,  $v''$  — удельный объем жидкости и пара;  $\mu'$  — вязкость жидкости;  $\sigma$  — поверхностное натяжение;  $a_1$ ,  $a_2$  — коэффициенты.

Первый член правой части уравнения (1) есть относительная энтальпия, при которой начинается интенсивное парообразование, второй член — расход жидкости в пристенном слое [2].

Формулу (1) преобразуем к виду

$$(q_{кр}/\rho w r) = (B_2 - x_{кр})/B_1. \quad (2)$$

Особенностью проведения опытов по изучению кризиса кипения воды в кольцевых каналах (как и в трубах) является то, что обычно (при  $x_{кр} > 0$  всегда) величина  $x_{кр}$  не измеряется, а рассчитывается через относительную энтальпию на входе  $x_{вх}$  по уравнению баланса тепла. Поэтому погрешность  $x_{кр}$  существенно больше погрешности опытных значений  $x_{вх}$ , где  $x_{вх}$  — относительная энтальпия на входе в канал. Исходя из этого, опытные данные целесообразно обобщать, используя в качестве параметра  $x_{вх}$ , а не  $x_{кр}$  [3]. Поэтому в формуле (2) заменим  $x_{кр}$  на  $x_{вх}$  и получим

$$(q_{кр}/\rho w r) = (B_2 - x_{вх})/(B_1 + 4DL_o). \quad (3)$$

Для оптимизации формулы (3) использовали тот же массив опытных данных, что и в работе [1]. Этот массив содержал режимные параметры на выходе канала и размеры канала, но в нем отсутствовала относительная энтальпия на входе  $x_{вх}$ . Поэтому в формуле (3) величина  $x_{вх}$  была заменена на ее расчетное значение

$$(q_{кр}/\rho w r) = (B_2 - x_{кр} + z)/(B_1 + 4DL_o), \quad (4)$$

где  $z = (4q_{кр}DL_o)/(\rho w r)$ .

Формально в формулу (4) входит  $x_{кр}$ , по существу — расчетное значение  $x_{вхр}$ , так как  $x_{кр} - z = x_{вхр}$ , где  $x_{вхр}$  — расчетное значение  $x_{вх}$ . Погрешность  $x_{вхр}$  равна погрешности  $x_{вх}$  и меньше погрешности  $x_{кр}$  [3]. Учитывая это, формула (4) является более предпочтительной по сравнению с формулой (2), так как позволяет обобщить опытные данные с меньшей погрешностью.

Формула (4) имеет не явный вид относительно  $q_{кр}$ , однако это не является препятствием для ее оптимизации по опытным данным.

При оптимизации формулы (4) использовали опытные данные, для которых  $x_{кр} < 0,8x_{гр}$ , где  $x_{гр}$  — граничное паросодержание. Оно рассчитывалось по формуле [4]

$$x_{гр} = 1 - 0,86 \exp(-19/We^{0.5}). \quad (5)$$

Множитель 0,8 был взят как запас на возможную погрешность формулы (5).

Результаты обработки опытных данных приведены в таблице, в которой указаны диапазоны параметров, число опытов, среднеарифметическая и среднеквадратичная погрешности и значения коэффициентов.

Из таблицы видно, что в обработке было использовано 2885 и 1415 опытных значений  $q_{кр}$  соответственно при обогреве внутренней и наружной стенки кольцевого канала (в более широком диапазоне параметров по сравнению с тем, для которого предложена формула [1]). Из таблицы также видно, что и значения  $q_{кр}$  изменялись в широком диапазоне (более чем в 10 раз). Формула (4) описывает опытные данные со среднеквадратичной погрешностью 0,114 и 0,092 соответственно для внутреннего и наружного обогрева при среднеарифметической погрешности менее 0,01.

Диапазон параметров и погрешности, с которыми формула (4) описывает опытные данные [1]

| Характеристики                                 | Обогрев     |             |
|------------------------------------------------|-------------|-------------|
|                                                | Внутренний  | Наружный    |
| Давление, МПа                                  | 3,5—17,5    | 3,5—17,9    |
| Массовая скорость, кг/(м <sup>2</sup> ·с)      | 72—8408     | 89—4145     |
| Относительная энтальпия на выходе              | -0,98—0,612 | -0,59—0,765 |
| Внутренний диаметр, мм                         | 6—42        | 5—32        |
| Наружный диаметр, мм                           | 10—48       | 8,2—36      |
| Разность диаметров, мм                         | 2—9,4       | 2,8—10      |
| Обогреваемая длина, мм                         | 199—2743    | 199—1500    |
| Относительная обогреваемая длина               | 48,8—389    | 40,2—375    |
| Критический тепловой поток, МВт/м <sup>2</sup> | 0,5—11,7    | 0,41—10,1   |
| Число опытов                                   | 2885        | 1415        |
| Среднеарифметическая погрешность               | -0,008      | -0,0098     |
| Среднеквадратичная погрешность:                | 0,114       | 0,092       |
| $a_1$                                          | 10,2        | 8,03        |
| $a_2$                                          | 2,23        | 2,59        |

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  различаются для каналов с внутренним и наружным обогревом. Это можно объяснить тем, что в однофазном потоке касательные напряжения на внутренней и наружной стенках кольцевого канала немного различаются. Можно ожидать, что и в двухфазном потоке касательные напряжения также будут различными. Вследствие этого начало интенсивного парообразования и расход жидкости в пристенном слое также будут различными [2].

При оптимизации формулы (4) использовали опытные данные для относительно длинных каналов ( $L_0 > 40$ ), тем не менее влияние длины проявляется, хотя и небольшое. При  $x_{вк} \ll -(B, q_{кр})/(\rho w t)$  влиянием длины канала можно пренебречь.

Вывод о том, что формула (4) описывает опытные данные с меньшей погрешностью по сравнению с формулой (2), подтвердился проведенной проверкой: среднеквадратичные погрешности формулы (2) были найдены равными 0,246 и 0,307 соответственно для опытов с внутренним и наружным обогревом, т.е. большими по сравнению с погрешностями формулы (4), хотя использовался один и тот же массив опытных данных, но различные параметры:  $\rho w$ ,  $x_{кр}$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $l_0$ ,  $p$  для формулы (2) и  $\rho w$ ,  $x_{вк}$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $l_0$ ,  $p$  для формулы (4). В первом случае погрешность опытных данных больше, чем во втором, так как погрешность  $x_{кр}$  больше погрешности  $x_{вк}$ .

В формулу (4) входят два эмпирических коэффициента  $a_1$  и  $a_2$ , и тем не менее она описывает влияние на критический тепловой поток пяти параметров: давления, массовой скорости, относительной энтальпии (паросодержания), ширины и длины кольцевого канала. Это позволяет сделать вывод о том, что формула (4) в основном правильно отражает главные закономерности кризиса кипения. Для сравнения отметим, что в формулу [1] входят 11 эмпирических коэффициентов и она описывает опытные данные в меньшем диапазоне изменения параметров, чем формула (4).

При практических расчетах может оказаться более удобным вместо формулы (4) использовать формулу (2), если заданы  $x_{кр}$  и другие параметры, формулу (3), если задана  $x_{вк}$ , формулу (1), если задан тепловой поток. Формулы (1)—(4) можно преобразовать одна в другую, используя только уравнение баланса тепла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков В.П., Судницын О.А., Судницына М.О. Критический тепловой поток при течении воды в кольцевых каналах. — Труды Межд. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР». Т. 1. Обнинск, 1998, с. 311—319.
2. Ивашкевич А.А. Приближенная модель кризиса кипения воды в длинных равномерно обогреваемых трубах (нелинейное приближение): Препринт ФЭИ-2352, 1994. 18 с.
3. Ивашкевич А.А. Выбор параметров для обобщения опытных данных по критической плотности теплового потока при течении воды в трубах. — Теплоэнергетика, 2000, № 5, с. 43—45.
4. Гальченко Э.Ф., Сергеев В.В., Юрков Ю.И., Ремизов О.В. Исследование ухудшения теплообмена в кольцевых каналах. — Там же, 1984, № 5, с. 44—46.