

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ КРИЗИСА КИПЕНИЯ ДЛЯ СБОРОК С КВАДРАТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ СТЕРЖНЕЙ

А.А. Ивашкевич

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Предложенная ранее модель кризиса кипения использована для обобщения опытных данных, полученных при вынужденном течении воды в пучках с квадратным расположением стержней. Для обобщения использовался массив из 954 опытов, полученных при давлениях 4,1–16,6 МПа. Результаты обработки опытных данных показали, что модель может быть использована для обобщения опытных данных.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для теплогидравлических расчетов активных зон ядерных энергетических реакторов используются коды RELAP, KOPCAR и др. [1]. В этих кодах расчет кризиса кипения выполняется в два этапа: сначала рассчитывается величина критического теплового потока ($q_{кр}$) при равномерном тепловыделении, которая затем пересчитывается для условий неравномерного тепловыделения по длине, используя так называемый фактор формы. Рекомендации для его расчета предложены в ряде работ, например, в справочнике [2].

Рекомендации по расчету $q_{кр}$ в пучках равномерно обогреваемых стержней, расположенных по квадратной упаковке, приведены в [3–8]. В работе [3] рассмотрены результаты исследований [4, 5]; в работе [4] для расчета $q_{кр}$ предложено эмпирическое соотношение; в [3, 5, 6] предложены методы пересчета значений $q_{кр}$, взятых из скелетных таблиц для труб диаметром 8 мм, на пучки стержней; в [7, 8] предложены скелетные таблицы для пучков с квадратным расположением стержней. Поиски соотношений, обобщающих опытные данные по кризису кипения, продолжаются в [9]; в [10] была предложена упрощенная модель кризиса кипения. Однако эта модель не учитывает теплогидравлическую неравноценность сборок стержней, турбулизирующее влияние дистанционирующих решеток, относительную длину обогрева (l_0/d_T) и относительный шаг стержней. По оценке авторов [8] влияние каждого из этих параметров составляет 0,82–1; 1–1,34; 1–1,4; и 0,88–1,36 соответственно для использованного массива опытных данных [13]. Цель настоящей работы – проверить идею, заложенную в упомянутой упрощенной модели [10], на опытных данных, полученных на сборках с квадратным расположением стержней, в части зависимости от режимных параметров (давления, массовой скорости, относительной балансной энтальпии). Естественно, что учет влияния указанных выше геометрических параметров позволил бы снизить погрешность описания критического теплового потока в рамках данной модели.

© А.А. Ивашкевич, 2007

ВИД ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В работе [10] была предложена упрощенная модель кризиса кипения при вынужденном течении воды в каналах. Для критического теплового потока получено приближенное выражение

$$\frac{q_{кр}}{pwr} = \frac{B_2 - x_{кр} + \left[(B_2 - x_{кр})(B_2 - x_{кр}) + 4B_1B_3(1 - x_{кр}) \right]^{0.5}}{2B_1}, \quad (1)$$

где $B_1 = 8/\xi$, $B_2 = 1/(a_1 + B_4)$, $B_3 = [\xi(1 - B_2)v^{1.33}]/16$, $B_4 = (a_2 We)/(Re^{0.75}v^{0.333})$, $Re = (\rho w d_t)/\mu'$, $We = [d_t v'(\rho w)^2]/\sigma$, $d_t = (4F)/\Pi_0$, $v = v'/v''$, $x_{кр}$ – относительная балансная энтальпия (паросодержание) в сечении кризиса (на выходе из пучка), pw – массовая скорость, Π_0 – обогреваемый периметр пучка, F – площадь проходного сечения пучка для воды, x – коэффициент гидравлического сопротивления, r – теплота парообразования, v' и v'' – удельный объем жидкости и пара, μ' – вязкость жидкости, σ – поверхностное натяжение, a_1, a_2 – коэффициенты (теоретически $a_1 = 1$).

В модели [10] при получении формулы (1) был сделан ряд допущений и упрощений, поэтому формула (1) является приближенной и к ней следует относиться как к рабочей гипотезе.

ФОРМУЛА ДЛЯ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В уравнение (1) входит коэффициент гидравлического сопротивления x при течении кипящего потока. Рекомендации для его расчета при течении кипящей воды в пучках с квадратным расположением стержней нам не известны. Поэтому используем следующий прием – применим формулу для гидравлического сопротивления при кипении воды в кольцевом канале и введем поправки на геометрию канала, предложенные для однофазного потока. Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при кипении воды используем формулу типа

$$\xi_k = a_0 Re^{-0.386} + a_{00}, \quad (2)$$

где ξ_k – коэффициент гидравлического сопротивления кольцевого канала. Согласно работе [11], для кипения воды в кольцевых каналах эмпирические значения коэффициентов равны $a_0 = 2,78$ и $a_{00} = 0$.

Для учета геометрии канала подойдут рекомендации, предложенные в справочнике [2] для однофазного потока

$$\xi = \kappa \xi_r, \quad (3)$$

где κ – коэффициент, учитывающий геометрию канала, ξ_r – коэффициент гидравлического сопротивления для круглой трубы. Для труб $\kappa = 1$, для кольцевых каналов $\kappa = 1,08$, для пучков стержней, расположенных по квадратной упаковке,

$$\kappa = 0,59 + 0,19(s_o - 1) + 0,52\{1 - \exp[-10(s_o - 1)]\}, \quad (4)$$

где $s_o = s/d_c$, s – шаг стержней, d_c – диаметр стержней. О правомерности использования формул (3) и (4) можно будет судить по результатам обработки опытных данных.

Заменим в комплексах B_1 и B_3 , входящих в формулу (1), величину x по формулам (2)–(4). Получаем приближенное выражение для критического теплового потока

$$\frac{q_{кр}}{pwr} = \frac{B_2 - x_{кр} + \left[(B_2 - x_{кр})(B_2 - x_{кр}) + 4B_1B_3(1 - x_{кр}) \right]^{0.5}}{2B_1}, \quad (5)$$

где $B_1 = 8/[k(a_3/Re^{0.386} + a_5)]$, $B_2 = 1/(a_1 + B_4)$ (если $B_2 > 1$, то $B_2 = 1$), $B_3 = [kv^{1.33}(1 - B_2)(a_4/Re^{0.386} + a_6)]/16$, $B_4 = (a_2 We)/(Re^{0.75}v^{0.333})$, $a_1 = 1$, $a_3 = a_0/1,08 = 2,57$, $a_5 \approx 0$, теоретически $a_1 = 1$, $a_4 = a_3$ и $a_6 = a_5$.

Особенностью проведения опытов по нахождению критических тепловых потоков при вынужденном течении воды в пучках стержней (так же, 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 в пучок $x_{вх}$ по уравнению баланса тепла ($x_{вх}$ – относительная энтальпия на входе в пучок стержней). Вследствие этого погрешность $x_{кр}$ больше погрешности $x_{вх}$. Исходя из этого, опытные данные по кризису кипения целесообразно обобщать, используя в качестве одного из параметров $x_{вх}$, а не $x_{кр}$ [12]. Заменяя в формуле (5) $x_{кр}$ на $x_{вх}$ по уравнению баланса тепла, получаем

$$\frac{q_{кр}}{\rho w r} = \frac{B_7 - x_{вх} + [(B_7 - x_{вх})(B_7 - x_{вх}) + 4B_3B_6(1 - x_{вх})]^{0.5}}{2B_6}, \quad (6)$$

где $B_5 = (P_0 l_0)/F$, $B_6 = B_1 + B_5$, $B_7 = B_2 - B_3B_5$.

ПРОВЕРКА ФОРМУЛЫ (6)

Формула (6) позволит обобщить опытные данные с меньшей погрешностью по сравнению с формулой (5). Для проверки и оптимизации формулы (6) использовался массив опытных данных по кризису кипения в равномерно обогреваемых пучках стержней, расположенных по квадратной упаковке, из банка данных [13]. Банк содержит данные 965 опытов. Использовались данные 954 опытов, для которых $x_{вх} < 0$. Данные 11 опытов не использовались, т.к. они получены при $x_{вх} > 0$. Основные параметры массива данных приведены в табл. 1, из которой видно, что опыты проведены в широких диапазонах изменения давления, массовой скорости, относительной энтальпии (паросодержания) и размеров пучков стержней.

В формулу (6) входят шесть эмпирических коэффициентов, поэтому может возникнуть сомнение в том, что при большом числе коэффициентов можно любой формулой описать опытные данные. Чтобы развеять это сомнение была проведена проверка формулы (6) в частных случаях, когда число коэффициентов можно сократить.

Первый случай. Проверка проводилась при одном оптимизируемом коэффициенте a_2 , остальные коэффициенты были взяты постоянными: $a_1 = 1$, $a_3 = a_0/1,08 = 2,57$; $a_4 = a_3$, $a_5 = a_{00} = 0$ и $a_6 = a_5$. Результаты обработки опытных данных приведены в табл. 1, из которой видно, что формула (6) при $a_2 = 1,21$ согласуется с опытными данными с погрешностями $\delta_{ар} = -0,0161$ и $s_{ск} = 0,0854$ (где $\delta_{ар}$ – среднеарифметическая погрешность, $s_{ск}$ – среднеквадратичная погрешность). Относительная погрешность находится в пределах $-0,280 \div 0,260$ (где $\delta = (q_{крр}/q_{кρο}) - 1$, $q_{крр}$ и $q_{кρο}$ – расчетное и опытное значения $q_{кр}$).

Второй случай. Проверка проводилась при трех оптимизируемых коэффициентах a_2 , a_3 и a_4 , остальные коэффициенты были приняты равными: $a_1 = 1$, $a_5 = a_{00}$ и $a_6 = a_5$. Результаты обработки опытных данных также приведены в табл. 1, из которой видно, что формула (6) согласуется с опытными данными с погрешностями $\delta_{ар} = -0,0055$ и $s_{ск} = 0,0682$. Относительная погрешность δ находится в пределах $-0,188 \div 0,210$.

То, что формула (6) с тремя и даже с одним эмпирическим коэффициентом описывает влияние на $q_{кр}$ пяти параметров (массовой скорости, относительной энтальпии, диаметра и шага стержней и давления) можно рассматривать как подтверждение обоснованности допущений, принятых при получении формулы (6).

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМУЛЫ (6)

С целью уменьшения погрешности формулы (6) была проведена ее оптимизация при шести коэффициентах $a_1 - a_6$. Результаты обработки опытных данных также приведены в табл. 1, из которой видно, что формула (6) с шестью оптимизированными

Таблица 1

Диапазоны параметров, число опытов и погрешности, с которыми формула (6) обобщает опытные данные

Параметры	$x_{вх} < -0,01$		
Число опытов N	954		
Давление p , МПа	$4,1 \div 15,6$		
Массовая скорость ρw , кг/(м ² ·с)	$112 \div 4810$		
Относительная энтальпия на входе $x_{вх}$	$-0,888 \div -0,012$		
Относительная энтальпия на выходе $x_{кр}$	$-0,175 \div 0,955$		
Диаметр стержней d_c , мм	$10,2 \div 15,0$		
Тепловой диаметр d_t , мм	$12,2 \div 48,2$		
Относительный шаг стержней s_o	$1,15 \div 1,88$		
Длина стержней l_o , мм	$760 \div 7000$		
Относительная длина стержней L_o	$35,2 \div 503$		
Число стержней l_c	$4 \div 20$		
Критический тепловой поток $q_{кр}$, МВт/м ²	$0,213 \div 3,45$		
Число коэффициентов	1	3	6
Коэффициент a_1	1*	1*	0,815
Коэффициент a_2	1,21	1,76	1,95
Коэффициент a_3	2,57*	3,57	2,16
Коэффициент a_4	2,57*	1,84	1,20
Коэффициент a_5	0*	0*	0,00833
Коэффициент a_6	0*	0*	0,00859
Относительная погрешность δ	$-0,280 \div 0,260$	$-0,188 \div 0,210$	$-0,197 \div 0,210$
Среднеарифметическая погрешность $\delta_{ар}$	$-0,0161$	$-0,0055$	$-0,0025$
Среднеквадратичная погрешность $\sigma_{ск}$	0,0854	0,0682	0,0595

Примечание: * – значение коэффициента принято постоянным.

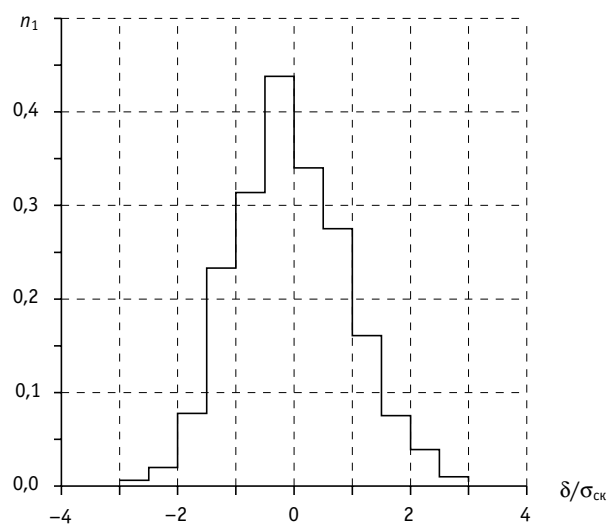


Рис. 1. Гистограмма распределения погрешностей

коэффициентами обобщает 954 опытных значения $q_{кр}$ в широких диапазонах изменения параметров с погрешностями $\delta_{ар} = -0,0025$ и $\sigma_{ск} = 0,0595$. Относительная погрешность δ находится в пределах $-0,197 \div 0,210$. Гистограмма погрешностей приведена на рис. 1. В интервале $\delta/\sigma_{ск} = \pm 3$ находится 99,6% опытных данных.

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМУЛЫ (6)

С целью уменьшения погрешности формулы (6) весь диапазон изменения давления был разделен на три поддиапазона 4–8, 8–12 и 12–16 МПа. Для каждого поддиапазона была проведена оптимизация коэффициентов, входящих в формулу (6). Результаты приведены в табл. 2, из которой видно, что погрешность формулы (6) несколько уменьшилась и находится в пределах $\sigma_{ск} = 0,0502 \div 0,0525$.

Таблица 2

Диапазоны параметров, числа опытов, значения коэффициентов и погрешности, с которыми формула (6) обобщает опытные данные по $q_{кр}$ в различных поддиапазонах давлений

Давление p , МПа	4,1 ÷ 7,9	8,0 ÷ 11,9	12,2 ÷ 15,6
Число опытов N	407	169	378
Массовая скорость rw , кг/(м ² ·с)	112 ÷ 4100	344 ÷ 2550	209 ÷ 4810
Относительная энтальпия на входе $x_{вх}$	-0,539 ÷ -0,012	-0,369 ÷ -0,012	-0,888 ÷ -0,050
Относительная энтальпия на выходе $x_{кр}$	0,012 ÷ 0,955	-0,018 ÷ 0,610	-0,175 ÷ 0,692
Диаметр стержней d_c , мм	10,2 ÷ 15,0	10,2 ÷ 14,3	10,2 ÷ 13,5
Тепловой диаметр d_t , мм	13,4 ÷ 48,2	12,2 ÷ 48,2	12,2 ÷ 22,1
Относительный шаг стержней s_0	1,15 ÷ 1,88	1,15 ÷ 1,88	1,15 ÷ 1,33
Длина стержней l_0 , мм	760 ÷ 7000	1180 ÷ 7000	1180 ÷ 7000
Относительная длина стержней L_0	35,2 ÷ 503	35,2 ÷ 503	53,4 ÷ 503
Число стержней p_c	4 ÷ 16	4 ÷ 20	4 ÷ 20
Критический тепловой поток $q_{кр}$, МВт/м ²	0,213 ÷ 3,45	0,390 ÷ 2,79	0,307 ÷ 2,79
Коэффициент a_1	0,860	0,848	0,815
Коэффициент a_2	1,72	2,35	2,51
Коэффициент a_3	2,08	2,74	2,39
Коэффициент a_4	1,22	1,00	1,39
Коэффициент a_5	0,00786	0,0102	0,00763
Коэффициент a_6	0,00884	0,00632	0,0111
Относительная погрешность δ	-0,230 ÷ 0,200	-0,128 ÷ 0,152	-0,150 ÷ 0,167
Среднеарифметическая погрешность $\delta_{ар}$	-0,0027	0,0011	-0,0036
Среднеквадратичная погрешность $\sigma_{ск}$	0,0524	0,0523	0,0510

СРАВНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМУЛЫ (6) С ПОГРЕШНОСТЯМИ ДРУГИХ МЕТОДОВ

В работах [3, 5–7] были предложены методы пересчета значений $q_{кр}$ из скелетной таблицы для круглых труб диаметром 8 мм на пучки стержней. Проведенная в работе [3] проверка показала, что предложенные в [3, 5] методы обобщают 7652 значения $q_{кр}$, полученные в равномерно обогреваемых пучках стержней с квадратной упаковкой, со среднеквадратичными погрешностями 0,105 и 0,132 соответственно. В работе [8] была проведена проверка, которая показала, что предложенные в

работах [3, 4, 8] методы обобщают 963 значения $q_{кр}$ из банка [13] со среднеквадратичными погрешностями 0,102, 0,10 и 0,07 соответственно. Таким образом, формула (6) по точности не уступает методам [3–8].

ОБСУЖДЕНИЕ

Недостатком формулы (6) является то, что она не учитывает влияние дистанционирующих решеток на $q_{кр}$. Отметим, что это влияние не учитывается в формуле, предложенной в работе [4] для пучков с квадратным расположением стержней, и в формулах, предложенных в работах [14–18] для пучков с треугольным расположением стержней. Однако в работах [3, 5, 6–8] предложено учитывать влияние дистанционирующих решеток. Естественно, что степень влияния дистанционирующей решетки на критический тепловой поток зависит от ее конструкции, режимных параметров и т.д.

Модель [10] применима для бесконечной решетки длинных стержней. Выше отмечалось, что эта модель не учитывает ряд факторов, влияющих на кризис кипения (теплогидравлическую неравноценность сборок стержней, длину стержней и т.д.). Тем не менее формула (6), вид которой был получен на основании модели, а значения коэффициентов (число которых равно 1–6) найдены из обработки опытных данных, обобщает опытные данные в широких пределах изменения параметров с удовлетворительной погрешностью (см. табл. 1). Это можно рассматривать как подтверждение правильности основных положений модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная в работе [10] модель кризиса может служить основой для обобщения опытных данных по критическим тепловым потокам при течении воды в пучках с расположением стержней по квадратной упаковке в части зависимости от режимных параметров.
2. На основании предложенной в работе [10] модели кризиса кипения получена приближенная формула (6) для критического теплового потока при вынужденном течении воды в равномерно обогреваемых пучках стержней, расположенных по квадратной упаковке.
3. Формула (6) обобщает 954 опытных значения $q_{кр}$ со среднеквадратичной погрешностью от 0,0595 до 0,0854 в зависимости от числа эмпирических коэффициентов (см. табл. 1).
4. Формула (6) с шестью эмпирическими коэффициентами и разбиением всего диапазона изменения давления на три поддиапазона описывает опытные данные со среднеквадратичной погрешностью от 0,0510 до 0,0524 (см. табл. 2).

Литература

1. Хабенский В.Б., Зейгарник Ю.А., Малкин С.Д. Расчетные формулы для кризиса теплоотдачи при кипении в пучках стержней для контурных теплогидравлических кодов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 73–77.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
3. Min Lee. A critical heat flux approach for square rod bundles using the 1995 Groeneweld CHF table and bundle data of heat transfer research facility // Nuclear Engineering and Design. – 2000. – V. 197. – № 3. – P. 357–374.
4. Reddy D.C., Fighetti C.F. Parametric study of CHF data V.2 Generalised subchannel CHF correlation PWR and fuel assemblies/EPRI-NP-2609. – 1983.
5. Groeneweld D.C., Kirillov P.L. et al. A general prediction method for advanced water-cooled reactors (AWCR's)/Techdoc IAEA. Chapter 3. Sept. 3, 1997.

6. Бобков В.П., Смогалева И.П. Табличный метод описания критических тепловых потоков в сборках твэлов в квадратной упаковке//Атомная энергия. – 2003. – Т. 94. – Вып. 5. – С. 407-410.
7. Бобков В.П. Таблица для критических тепловых потоков в сборках тепловыделяющих стержней в квадратной упаковке//Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 68-72.
8. Бобков В.П., Ефанов А.Д., Смогалева И.П., Пометько Р.С. Таблица для критических тепловых потоков в сборках твэлов в квадратной упаковке//Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – Вып. 1. – С. 33-42.
9. Сергеев В.В. Обобщение данных по кризису кипения при подъемном движении воды в каналах//Теплоэнергетика. – 2000. – № 3. – С. 67-69.
10. Ивашкевич А.А. Приближенная модель кризиса кипения воды в длинных равномерно обогреваемых трубах (нелинейное приближение)/Препринт ФЭИ-2352: Обнинск, 1994. – 18 с.
11. Торгерсон Е.Дж., Нэбел Д.Х., Джиббонс Дж.Х. Модель кризиса теплоотдачи при кипении с подогревом в условиях вынужденной конвекции//Теплопередача. – 1974. – Т. 96. – № 1. – С. 82-86.
12. 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.
13. Бобков В.П., Блохин А.И., Ивашкевич А.А. и др. Центр теплофизических данных для ядерных энергетических установок//Атомная энергия. – 1982. – Т. 53. – Вып. 3. – С. 183-184.
14. Смолин В.Н., Поляков В.К. Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней//Теплоэнергетика. – 1967. – № 4. – С. 54-58.
15. Осмачкин В.С., Лысцова Н.Н. Сравнение опытных данных по условиям кризиса теплообмена в моделях топливных сборок реакторов ВВЭР с результатами расчета по методике ИАЭ/Препринт ИАЭ-2558. – 1975.
16. Безруков Ю.А., Астахов В.И., Брантов В.Г. и др. Экспериментальное исследование и аналитический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР//Теплоэнергетика. – 1976. – № 2. – С. 80-82.
17. Вампола Й., Коштеляк Я. Кризис теплообмена при вынужденном течении воды в вертикальных каналах с равномерным тепловыделением по высоте/Сб. докладов семинара СЭВ «Теплофизика – 82». – Т. 4. – Карловы Вары, 1982. – С. 11-16.
18. Перница Р., Чижек И. Соотношение для кризиса теплоотдачи в пучках стержней/ Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. «Теплофизика – 90». – Т. 2. – Обнинск, 1991. – С. 244-249.

Поступила в редакцию 1.09.2006