

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.24

ТАБЛИЧНЫЙ МЕТОД ОПИСАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В СБОРКАХ ТВЭЛОВ В КВАДРАТНОЙ УПАКОВКЕ

Бобков В.П., Смогалева И.П. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)

В работах российских и зарубежных исследователей в последние годы развиты методы табличного описания и расчета критических тепловых потоков в трубах [1], кольцевых и других одиночных каналах [2], треугольных сборках цилиндрических твэлов [3, 4]. В таблицах для труб приводится зависимость критических тепловых потоков от основных параметров: давления, массовой скорости, относительной энтальпии, диаметра, для коротких труб — относительного расстояния от места кризиса до входа в канал.

Табличный метод впервые предложен для труб в работе [5]. Далее он был развит для труб в исследованиях [6]. Позже эти работы продолжались в Чок-Риверской лаборатории [7] и ФЭИ [8]. В 1996 г. выпущена совместная с канадскими исследователями уже упомянутая версия таблиц для критических тепловых потоков в трубах [1]. Эти таблицы положены в основу расчета кризиса во многих каналах сложного профиля сечения и треугольных сборках твэлов. Они являются основой описания кризиса во всех других применяемых на практике каналах.

В работе [9], как и в более ранней работе [7], впервые была сделана попытка описать критический тепловой поток в треугольных сборках цилиндрических твэлов непосредственно таблицами для труб без введения существенных поправочных функций. Последние, на наш взгляд, являются необходимыми [10], особенно для треугольных сборок, иначе возникают большие ошибки описания, что вызвало появление публикаций [11—13], критикующих правомочность использования таблиц для труб в расчетах кризиса в сборках разных типов. Основная причина, которая привела канадских ученых к ошибочному выводу при применении таблиц для труб к расчету кризиса в треугольных сборках, состоит в том, что на ранней стадии не было полной ясности в соотношении критических тепловых потоков в трубах и сборках твэлов в широком диапазоне параметров и не могли быть учтены все особенности кризиса вследствие недостатка анализа экспериментальной информации. Следует отметить другие причины, не позволившие специалистам Чок-Риверской лаборатории заметить существенную разницу в описании критических тепловых потоков в трубах и треугольных сборках твэлов: авторы работ [7] и [9] не провели сравнительный анализ критических тепловых потоков в трубах и треугольных сборках, а также оперируют с ошибками, отнесенными к входным параметрам. Ошибки по этому методу в 2—3 раза меньше получаемых при обработке по выходным параметрам и внушают излишний оптимизм. Обработка по выходным параметрам позволяет получить более точные методы описания критических тепловых потоков.

Табличные методы для каналов при корректном использовании имеют существенные преимущества перед традиционными, основанными на аналитическом описании экспериментальных данных. Они предложены для широкого диапазона параметров, основаны на многочисленных экспериментах, дают непрерывное и гладкое описание критических тепловых потоков во всем поле параметров, наглядны для контроля и использования. Важным достоинством табличного метода описания критических тепловых потоков в каналах различного поперечного сечения является возможность их надежного предсказания в областях режимных и геометрических параметров, не только обеспеченных экспериментальными данными и вблизи них, но и в удаленных. Чем эта уверенность обоснована? Прежде всего использованием большого числа экспериментальных данных [14] и разработкой неко-

торой экстраполяционной модели, основанной на понятии «элементарной тепловой ячейки» [10]. Эта модель предсказала новые независимые параметры для описания критических тепловых потоков в каналах различного поперечного сечения. И наконец, выявлением закономерностей (тенденций) изменения критических тепловых потоков в зависимости от определяющих параметров и автомодельных зон. Это делалось последовательно для труб, кольцевых каналов и сборок твэлов. Выявленные закономерности оказались почти универсальными для одиночных каналов, за исключением незначительных поправок. Особенности для сборок оказались существенными. В работе [10] введено понятие «эффекта пучка» в его истинном значении. Оно включает в себя влияние на кризис взаимодействия параллельно включенных каналов — ячеек (точнее, макроячеек), под которыми подразумеваются части проходного сечения сборки, заключенные между соседними твэлами или между соседними твэлами и обечайкой. В работе [9] под «эффектом пучка» подразумевается другое: влияние геометрии сечения канала (макроячейки) на критический тепловой поток. Взаимодействие потоков в макроячейках сборок приводит в некоторых случаях к существенному снижению критических тепловых потоков в сборках по отношению к одиночным каналам.

Табличный метод, разработанный в ФЭИ для треугольных сборок цилиндрических твэлов, основан на использовании базовой таблицы для критических тепловых потоков в треугольных сборках твэлов с относительным шагом $s/d = 1.4$ и тепловым диаметром $d_h = 9,36$ мм. Критические тепловые потоки по этому методу рассчитываются по соотношению

$$Q_{кр} = Q_{таб} K_1 K_2 K_3 K_4,$$

где $Q_{таб}$ принимается по базовой таблице для критических тепловых потоков в сборках для $d_h = 9,36$ мм и $s/d = 1,4$ ($d_h = d[1,103(s/d)^2 - 1]$); $K_1 = F(d_h) = (d_h/9,36)^{-1/3}$ — поправка на тепловой диаметр макроячейки; $K_2 = F(s/d) = 0,2 + 0,57s/d$ при $s/d > 1,1$ (до 1,52) — поправка на шаг решетки, s/d ; $K_3 = F(L) = 1,0 + 0,6 \exp(-0,01L/d_h)$ — поправка на влияние входных устройств; $K_4 = F(k_f) = 1 + A \exp(-0,1Z/d_h)$ — поправка на турбулизирующее влияние дистанционирующей решетки, где $A = 1,5K_f^{0,5}(G/1000)^{0,2}$; Z — расстояние от места кризиса до ближайшей дистанционирующей решетки; L — расстояние от места кризиса до входа в сборку; G — массовая скорость; K_f — коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки. Поправка $F(k_f)$ принята по работе [9].

Метод расчета, основанный на этой базовой таблице, дает наилучшие результаты в описании экспериментальных данных для треугольных сборок [15], а также смешанных сборок РБМК [16]. Эти успехи в использовании табличного метода дали надежду на его использование для расчета критических тепловых потоков в сборках с квадратным расположением твэлов. Настоящая работа посвящена разработке метода использования табличного метода для описания и расчета критических тепловых потоков в таких (квадратных) сборках. Для этого был сформирован массив экспериментальных данных для сборок с квадратным расположением стержней из базы данных ФЭИ [14]. Этот массив характеризуется следующими параметрами: число экспериментальных точек — 963, диаметр стержней (d) — от 10,2 до 15 мм, относительный шаг стержней (s/d) — от 1,15 до 1,88, число твэлов в сборке — 4, 9, 16 и 20, геометрия сечения обечайки — прямоугольник, относительная длина сборки (относительное расстояние от места кризиса до входа в сборку) (L/d_h) — от 40 до 960, все твэлы обогреваемые, обогрев равномерный по длине и сечению, диапазон давления (P) — от 4 до 16 МПа, диапазон массовой скорости (G) — от 115 до 4850 кг/(м²·с), диапазон паросодержания (X) — от -0,17 до 0,87.

Для использования табличного метода в сборках твэлов в квадратной упаковке необходимо и достаточно было найти некоторые поправочные функции, которые отражают особенную геометрию. Эти поправочные функции на геометрию сечения сборки в конечном итоге имеют вид $K_5 = F_{geom} = F(P)F(G)F(X)$, где $F(X) = 0,92 + 0,76X - 1,02X^2$; $F(P) = 1,5 + 0,106P - 0,032P^2 + 0,0015P^3$; $F(G) = 1,45 - 0,352(G/1000) + 0,0796(G/1000)^2$; X — балансное паросодержание; P — давление, МПа; G — массовая скорость, кг/(м²·с). Поправочная функция на относительный шаг имеет другой вид, чем для треугольных сборок: $K_2 = F(s/d) = -1,46 + 2,87s/d - 0,78(s/d)^2$ при $s/d = 1,1$ —1,88. Вводится также поправка на теплогидравлическую неравноценность сборки: $K_6 = F(d_h/d_{h1}) = 0,6 + 0,4(d_h/d_{h1})$, где $d_h = d[1,274(s/d_0)^2 - 1]$ — тепловой диаметр внутренней (идеальной) ячейки; d_{h1} — тепловой диаметр всего сечения сборки. Поправка на турбулизирующее влияние дистанционирующей решетки имеет другой вид: $K_4 = F(k_f) = 1 + A \exp(-0,1Z/d_h)$, где $A = 0,9K_f^{0,5}(G/1000)^{0,2}$. Поправочные функции на тепловой диаметр и расстояние от входа принимаются прежними.

Таким образом, для расчета критического теплового потока в сборках твэлов в квадратной упаковке рекомендуется соотношение

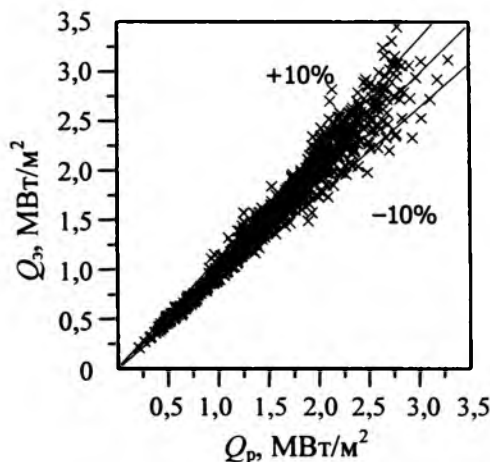
$$Q_{кр} = Q_{таб} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6, \quad (1)$$

где $K_1 = F(d_h) = (d_h/9,36)^{-1/3}$; $K_2 = F(s/d) = -1,46 + 2,87 s/d - 0,78(s/d)^2$ (при $s/d = 1,1—1,88$); $K_3 = F(L) = 1,0 + 0,6 \exp(-0,01 L/d_h)$; $K_4 = F(k_f) = 1 + A \exp(-0,1 Z/d_h)$, $A = 0,9 K_f^{0,5} (G/1000)^{0,2}$; $K_5 = F_{geom} = F(X)F(P)F(G)$; $K_6 = F(d_h/d_{h1}) = 0,6 + 0,4(d_h/d_{h1})$.

Рекомендуемый диапазон параметров для использования соотношения (1): давление — от 4 до 17 МПа; массовая скорость — от 100 до 5000 кг/(м²·с); балансное паросодержание — от -0,2 до 0,9; тепловой диаметр — от 10 до 40 мм; шаг расположения стержней — от 1,1 до 1,9; относительное расстояние до входа L/d_h — более 30; обогрев поперек сборки — равномерный, обогрев вдоль сборки — равномерный, пучки с дистанционирующими устройствами или без них.

При отсутствии других рекомендаций этот метод можно рекомендовать для расчета критических тепловых потоков и при неравномерном по сечению энерговыделению, если использовать поканальный расчет режимных параметров, и при неравномерном по длине энерговыделении, если использовать поправки на формфактор по длине.

На рисунке представлены результаты сравнения рассчитанных значений критических тепловых потоков с экспериментальными. Наблюдается хорошее согласие расчетов с экспериментами во всем диапазоне параметров. Средняя по всему массиву данных ошибка описания равна нулю, среднеквадратичная ошибка по выходным параметрам не превышает 14%, по входным параметрам — 7%.



Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета по предложенному методу

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groeneveld D., Leung L., Kirillov P., Bobkov V. e.a. The 1996 look-up table for critical heat flux in tubes. — Nucl. Engng Design, 1996, v. 163. p. 1—23.
2. Бобков В.П., Судницын О.А., Судницына М.О. Численное и аналитическое описание критического теплового потока в кольцевых каналах. — Атомная энергия, 1998, т. 86, вып. 3, с. 25—32.
3. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. Табличный метод расчета критического теплового потока в водоохлаждаемых треугольных сборках стержней. — Там же, 1999, т. 87, вып. 1, с. 17—24.
4. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. Критические тепловые потоки в треугольных пучках стержней (Скелетная таблица, версия 1997 г.). — Теплоэнергетика, 1999, № 11, с. 54—63.
5. Дорошук В.Е., Левитан Л.Л., Ланцман Ф.П. Исследования кризиса в равномерно нагретых трубах. ASME Publication, 1975, 75-WANT-22.
6. Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в круглых трубах: Препринт Ин-та высоких темп. 1-57, 1980.
7. Groeneveld D. e.a. The 1986-AECL-UO critical heat flux look-up table. — Heat Trans. Engng, 1986, v. 7, p. 22—46.
8. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. Новые таблицы критических тепловых потоков для воды в круглых трубах: Препринт ФЭИ-2225, 1991. 20 с.
9. Groeneveld D., Joobar K., Doefler S. e.a. The Effect of Fuel Subchannel Geometry on CHF. Thesis of Report to NURETH-5, 1992.
10. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зятинина О.А., Козина Н.В. Относительное описание кризиса кипения в пучках стержней и других сложных каналах. — Теплоэнергетика, 1997, № 3, с. 2—7.

11. Жуков Ю.М. Возможность использования скелетных таблиц для трубы при расчете кризиса теплоотдачи в пучках стержней водоохлаждаемых реакторов. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 2, с. 108—111.
12. Сергеев В.В. Обобщение данных по кризису теплообмена при кипении воды в трубах и стержневых сборках. — В сб.: Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР, 1998, т. 2. Обнинск, с. 330—337.
13. Lee M., Liao L. An assessment of the critical heat flux approaches of thermalhydraulic system analysis codes using bundl data from the heat-transfer research facility. — Nucl. Technol., 1994, v. 105, № 2, p. 216—230.
14. Ефанов А.Д., Кириллов П.Л., Смогалева И.П. и др. Теплогидравлическая база знаний для решения задач анализа и управления тяжелыми авариями. — В сб.: Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР, 1998, т. 2, с. 144—149.
15. Бобков В.П., Смогалева И.П. О точности описания различными кодами критических тепловых потоков в пучках. — Теплоэнергетика, 2001, № 3, с. 21—28.
16. Бобков В.П. Метод расчета критического теплового потока в смешанных сборках стержней. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 3, с. 25—28.

Поступило в Редакцию 8.02.02

УДК 621.039.54.001.63

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМАХ КИПЕНИЯ В ЗАСЫПКЕ ШАРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

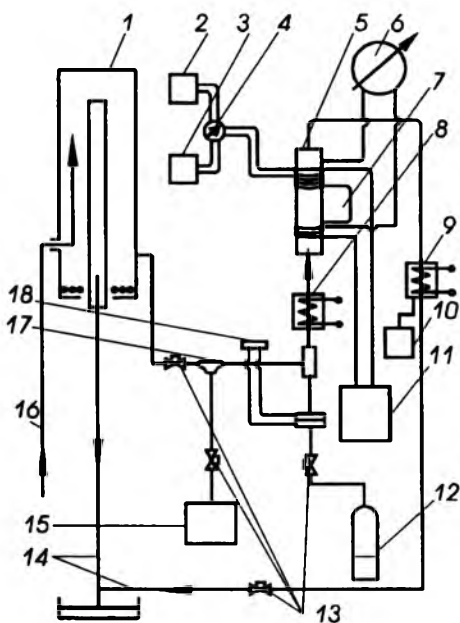
Лозовецкий В.В. (Моск. гос. ун-т леса),
Смирнов Л.П. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Теплообмен при различных режимах кипения в засыпке шаровых элементов, в частности, микро- и макротрещинах диаметром от 2 до 60 мм привлекает в последнее время внимание в связи с возможностью их использования в ВВЭР [1, 2].

В настоящей работе исследована теплоотдача при пузырьковом и переходном режимах кипения в засыпке шаровых элементов из свинца диаметром 3 мм. Схема установки показана на рис. 1. Она состояла из рабочего участка, изготовленного из эбонита, что позволяло достигать температуры шарового элемента в опытах до 300 °С. Внутренний диаметр рабочего участка 30 мм, длина 75 мм. В его нижней части была установлена решетка с семью закрытыми сеткой с высокой пористостью отверстиями диаметром 5 мм, над которой располагалась засыпка шаровых элементов. Для ее фиксации шаровые элементы сверху прижимались аналогичной по конструкции решеткой.

Вода в рабочий участок поступала из напорного бака с переливом, проходя через теплообменник, в котором она подогревалась до температуры на 2—4 °С

Р и с. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — напорный бак с переливом; 2, 3 — потенциометр КСП-4 и ПП-63 соответственно; 4 — переключатель термопар; 5 — рабочий участок; 6 — пьезометры; 7 — индуктор; 8 — теплообменник; 9 — холодильник; 10 — емкость; 11 — генератор УЗГ-4; 12 — баллон; 13 — вентили; 14 — слив в канализацию; 15 — термостат; 16 — подвод от водопровода; 17 — тройник; 18 — наклонный микроманометр



Р и с. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — напорный бак с переливом; 2, 3 — потенциометр КСП-4 и ПП-63 соответственно; 4 — переключатель термопар; 5 — рабочий участок; 6 — пьезометры; 7 — индуктор; 8 — теплообменник; 9 — холодильник; 10 — емкость; 11 — генератор УЗГ-4; 12 — баллон; 13 — вентили; 14 — слив в канализацию; 15 — термостат; 16 — подвод от водопровода; 17 — тройник; 18 — наклонный микроманометр