

УДК 536.24

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКЕЛЕТНЫХ ТАБЛИЦ ДЛЯ ТРУБЫ ПРИ РАСЧЕТЕ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

Жуков Ю.М. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»)

При расчете условий возникновения кризиса теплоотдачи в активной зоне водоохлаждаемого реактора в нормальных или аварийных режимах применяют эмпирические корреляции. Для разработки и верификации подобных рекомендаций используют экспериментальные данные, полученные на моделях, которые в той или иной степени имитируют геометрию, режимные параметры, форму поля энерговыделения по радиусу реальных ТВС.

Современные базы данных о кризисе теплоотдачи в пучках стержневых твэлов позволяют проводить масштабное сопоставление работоспособности уже известных и новых рекомендаций путем сравнения их статистических характеристик и выявления нежелательных сдвигов по тому или иному параметру. С появлением у нас в стране и за рубежом вариантов скелетных таблиц с $q_{кр}$ в равномерно обогреваемой трубе наметилась тенденция их внедрения в термокоды вместо формул, специально разработанных для пучков стержней [1, 2]. Основной аргумент, приводимый в обоснование подобной концепции, заключается в том, что скелетные таблицы для трубы обладают более широким диапазоном исследованных параметров по сравнению с пучками стержней, что в первую очередь важно при расчете аварийных режимов.

Определенную роль при поиске альтернативы традиционному способу оценки $q_{кр}$ в пучках играет отставание в сопоставительном анализе достоверности современных баз данных по сравнению с трубами. Попытка обойти трудности, связанные с реальной сложностью пучков стержней, посредством ориентации на трубную или кольцевую

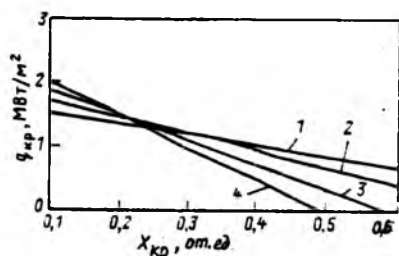


Рис. 1. Зависимость критического теплового потока от локального паросодержания для стержневых сборок и массовой скорости, равной 500 (1), 1000 (2), 2000 (3), 3000 кг/(м²·с) (4) (по формуле РНЦ «Курчатовский ин-т» [7])

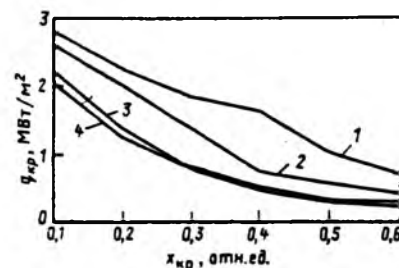


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для трубы диаметром 8 мм (вариант скелетных таблиц АЕСЛ-86 [2])

геометрию, где нет проблем в определении локальной массовой скорости и паросодержания, а также координаты возникновения кризиса теплоотдачи, может привести в конечном итоге при разработке процедуры перехода труба—пучок к серьезным осложнениям. Так, некоторые авторы уже столкнулись с необходимостью компенсации значительного влияния в первом случае давления [1], во втором — аксиальной неравномерности энерговыделения для ТВС с гексагональным размещением имитаторов [3]. Можно предположить, что с включением в анализ экспериментальных данных с неравномерным энерговыделением по радиусу сборки трудности обобщения значительно возрастут.

Наиболее известная в настоящее время канадская методика [2] имеет восемь эмпирических коэффициентов, необходимых для перехода труба—пучок по следующей схеме: скелетная таблица о $q_{кр}$ в трубе → эмпирические коэффициенты $K1, K2, \dots, K8$, отражающие особенности пучков стержней → $q_{кр}$ в пучке стержней.

В методике, предлагаемой ФЭИ [1], таких коэффициентов пока девять. Поскольку работа по ве-

рификации только начата и основной массив пучков с радиальной неравномерностью энерговыделения не рассматривался, не исключено, что число поправочных коэффициентов может возрасти. Анализ базы данных о пучках гладких стержней ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т», а также результаты обработки исследований на самодистанционирующихся элементах сложной формы показывают, что трубы и пучки могут иметь различную параметрическую зависимость $q_{кр}$ от массовой скорости, что серьезно осложняет разработку процедуры перехода труба—пучок.

В качестве примера на рис. 1, 2 для рабочего давления ВВЭР-440 12 МПа приведены кривые, иллюстрирующие этот тезис. Для выяснения возможной разницы в характере влияния W_j в трубе и пучке в свое время был поставлен сопоставительный эксперимент, указавший на более сильное влияние массовой скорости в случае круглой трубы (рис. 3, 4 [4]). По имеющимся в нашем распоряжении данным аналогичная ситуация наблюдается и для самодистанционирующихся пучков с элементами сложной формы.

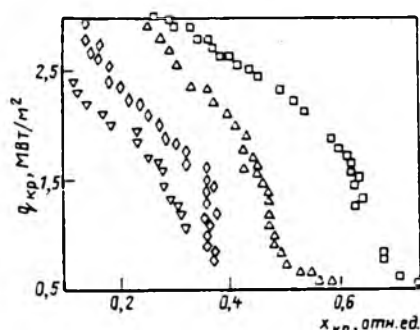
К настоящему времени для методики [2] уже известны результаты сопоставления с отечественными и зарубежными базами данных. Ниже приведены результаты такого сравнения на моделях ТВС ВВЭР [5], PWR и BWR [3, 6].

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ [2] НА БАЗЕ ДАННЫХ ДЛЯ ПУЧКОВ ГЛАДКИХ СТЕРЖНЕЙ

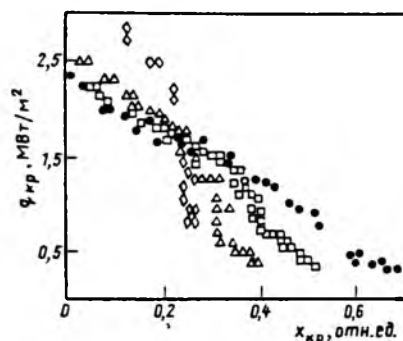
База данных РНЦ «Курчатовский ин-т» [5]. Исследования, использованные для верификации, проводили на пучках гексагональной геометрии с числом обогреваемых стержней от 7 до 36 и широким диапазоном давления, массовой скорости и паросодержания в кризисном сечении (табл. 1). Результаты расчета сравнивали с экспериментом по методике [2] и корреляции РНЦ «Курчатовский ин-т» (модернизированный вариант формулы [7]):

Т а б л и ц а 1. Характеристики экспериментальных участков, входящих в состав базы данных РНЦ «Курчатовский ин-т» ([5], с. 30)

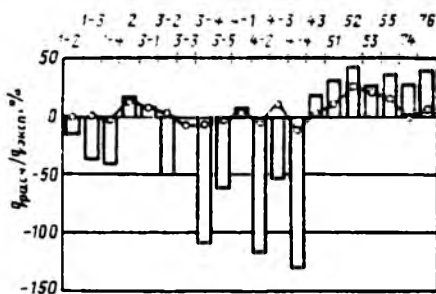
Организация	Номер участка	Число стержней	Длина участка, м	Диаметр стержня, мм	Давление, МПа	W_j , кг/(м ² ·с)
РНЦ «Курчатовский ин-т»	1	19	2,5	9,0	8—10	600—3100
	2	7	2,5	9,0	8—8,8	1500—3100
	3	19	2,5	9,0	3,3—10	428—3800
	4	37	2,5	9,0	2,2—9,4	220—3200
ОКБ «Гидропресс»	43	7	2,5	9,1	12,5	1000—3000
	51	7	3,5	9,1	12,5—16,8	1300—3000
	52	7	2,5	9,1	8,3—16,8	1500—3700
	53	7	1,75	9,1	8,3—16,8	1500—3500
	55	7	1,75	9,0	16,8	2500—3700
ЭНИН	74	7	1,0	9,0	10,3—18,6	750—3200
ЭНИН	76	7	1,8	9,0	10,3—18,6	750—3100



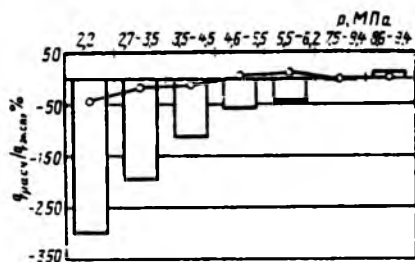
Р и с. 3. То же, что на рис. 2, при 7,8 МПа и массовой скорости, равной 1000 (□), 1600 (Δ), 2700 (◇), 4000 кг/(м²·с) (▽)



Р и с. 4. То же, что на рис. 1, при 7,4 МПа и массовой скорости, равной 600 (●), 1000 (□), 1500 (Δ), 2500 кг/(м²·с) (◇)



Р и с. 5. Среднеарифметическая ошибка расчета по формуле РНЦ «Курчатовский ин-т» (○) и методике [2] (—) в моделях ТВС ВВЭР [5]



Р и с. 6. Влияние давления на ошибку расчета по формуле РНЦ «Курчатовский ин-т» (○) и методике [2] (—) в 37-стержневой ТВС, исследованной на стенде КС [5]

стержней в гексагональной решетке. Из 11077 экспериментальных точек 2694 получены на 57 рабочих участках с аксиальной неравномерностью энерговыделения. В табл. 2 приведены результаты сопоставления расчетной методики [2] с экспериментальными данными.

$$q_{кр}(z) = 1,21 f_1 f_4 G^{0,4} \left[f_3 f_5 - f_2 G^{0,2} X(z) \right] / \{ 1 + F [q(z')/q(z)] / 3,54 \}$$

где функция f_{1-5} отражает влияние свойств теплоносителя; G — массовая скорость; z — продольная координата; $X(z)$ — равновесное массовое паросодержание; $F [q(z')/q(z)]$ — функция влияния аксиальной неравномерности энерговыделения.

Анализ показал, что методика [2] значительно завышает расчетное $q_{кр}$ при низком давлении 2,2 МПа и вдвое занижает при высоком давлении 17 МПа (рис. 5, 6). Влияние W_j и $x_{кр}$ на ошибку расчета также значительно в некоторых интервалах параметров, особенно при отрицательном паросодержании.

База данных Колумбийского университета. Работа [3] является расширенным вариантом более ранней публикации [6], в которой авторы использовали базу данных Колумбийского университета, насчитывающую более 11 тыс. точек, полученных на теплофизических стендах различных стран. 235 исследованных сборок, входящих в состав базы, имитируют условия охлаждения активной зоны PWR и BWR и имеют конфигурацию 3×3, 6×6 в квадратной решетке либо 19, 28 и 37

Т а б л и ц а 2. Статистические характеристики методики [2] на базе данных Колумбийского университета ([3], с. 229)

Поле по высоте	Размещение стержней	Число экспериментальных точек	Среднеарифметическая ошибка*	Дисперсия
Равномерное	Квадратное	7718	1,012	0,269
	Треугольное	490	1,346	0,445
	Всего	8208	1,032	0,294
Неравномерные	Квадратное	2611	1,019	0,368
	Треугольное	70	0,597	0,312
	Всего	2681	1,008	0,373
Итого		10889	1,026	0,315

* Среднеарифметическая ошибка рассчитывалась по отношению $q_{расч.}/q_{эксп.}$

ВЫВОДЫ

Результаты сопоставления методики [2] с экспериментальными данными о кризисе теплоотдачи в пучках стержневых ТВЭЛов из отечественной и зарубежной базы данных показывают следующее:

формула РНЦ «Курчатовский ин-т» по статистическим характеристикам значительно превосходит методику Гроеневельда при обобщении массива точек, лежащих в основе экспериментального обоснования теплотехнической безопасности отечественных ВВЭР. Использование скелетной таблицы для трубы (вариант AECL-86) в области низкого давления (2—5 МПа) приводит к завышению до сотен процентов $q_{\text{расч.}}/q_{\text{эксп.}}$. Однако при давлении выше 12 МПа расчет в среднем в 1,5 раза ниже эксперимента;

для имитаторов, моделирующих условия возникновения кризиса теплоотдачи в активной зоне PWR и BWR, методика [2] хорошо описывает массив из 11 тыс. точек базы данных Колумбийского университета. Однако в случае треугольного расположения стержней наблюдается значительное расхождение (до 40%) между расчетом и экспериментом. Дополнительная корректировка фактора K_2 для пучков, предпринятая авторами работы [3], не скомпенсировала систематическое занижение расчета (на 37%) для треугольного расположения имитаторов при наличии аксиальной неравномерности энерговыделения.

Многолетний опыт эксплуатации отечественных энергетических реакторов показывает, что современная база данных и аккуратная эмпирическая корреляция позволяют достаточно уверенно рассчитывать допустимую тепловую мощность пучков стержней в широком диапазоне геометрических и режимных параметров, способов дистанционирования, полей энерговыделения без привлечения дополнительной процедуры перехода труба—пучок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобков В.П., Зяткина О.А., Козина Н.В. и др. Кризис кипения в каналах различной геометрии поперечного сечения: Препринт ФЭИ-2314, 1993.
2. Groeneveld D., Cheng S., Doan T. 1986 AECL-UO critical heat flux lookup table. — Heat Transfer Engng, 1986, v. 7, № 1—2.
3. Lee M., Liao L. An assessment of the critical heat flux approaches of thermal—hydraulic system analysis codes using bundle data from the heat transfer research facility. — Nucl. Techn., 1994, v. 105, p. 216—230.
4. Смолин В.Н., Поляков В.К. Интенсификация теплообмена в пучке стержней с помощью локальных завихрителей. — В кн.: Сб. ТФ-74 «Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней», 1974, с. 307.
5. Кобзарь Л.Л., Сулов А.И. Верификация модели расчета критических тепловых потоков в программе RELAP5/MOD3 на основании банков данных. Отчет ИАЭ-32/1-1868-92.
6. Lee M., Huang K., Liao L. Assesment of CHF correlation in thermal—hydraulic system analysis codes. — Transaction ANS, 1991, № 10—14, p. 645.
7. Осмачкин В.С., Лысцова Н.Н. Сравнение опытных данных по условиям кризиса теплоотдачи в моделях топливных сборок реакторов ВВЭР с результатами расчетов по методике ИАЭ: Препринт ИАЭ-2558, 1975.