

сделать вывод о слабом влиянии термического сопротивления теплообмену на релаксацию температуры в ТВС быстрых и водоохлаждаемых реакторов. Это можно объяснить превышением подогрева теплоносителя над температурным напором стенка—жидкость.

При моделировании стационарных процессов теплообмена в качестве имитаторов твэлов используются трубки, обогреваемые изнутри электрической спиралью. Электрическая спираль изолируется от стенки трубки слоем кремнеорганики. Условием приближенного моделирования стационарных процессов является равенство эффективной теплопроводности трубки имитатора и твэла [8]. Экспериментальные и расчетные исследования показали, что при скачкообразном изменении энерговыделения температура оболочки имитатора теплоносителя на выходе из зоны энерговыделения также описывается зависимостью (1). Разработан метод теоретического определения t_p . Экспериментальные значения t_p находились приведением к виду (1) временных зависимостей для температуры оболочки имитатора, найденных в опытах при мгновенном отключении нагревателей модели.

Параметр t_p есть обобщенная динамическая характеристика ТВС или модели. Это позволяет сформулировать условие приближенного моделирования как равенство безразмерных значений параметров релаксации модели или натуры. Если в качестве масштаба времени принимается время транспортировки теплоносителя через зону энерговыделения, то условием приближенного моделирования является равенство ($t_p W/h_q$) модели и натуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.В., Сорокин А.П., Ушаков П.А. Анализ горячих пятен в ТВС активных зон быстрых реакторов. — Атомная энергия, 1987, т. 62, вып. 3, с. 153—158.
2. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. Теоретические основы и физика процесса. М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Богатырев И.Л., Богословская Г.П., Жуков А.В. и др. Система констант для поканального теплогидравлического расчета режимов работы ТВС реакторов с естественной и смешанной конвекцией: Препринт ФЭИ-2238, 1992.
4. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. Расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Huber F., Mattes K., Pepler W. et al. Loss of flow experiments in sodium in an electrically heated 37-pin bundle with sinusoidal axial heat flux distribution. — In: Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon, France, 1982, v. 1V, p. 341—349.
6. Михин В.И., Фетисова Л.Н. Численное исследование нестационарных температурных полей в центральных зонах ТВС ядерных реакторов: Препринт ФЭИ-2240, 1992.
7. Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Субботин В.И. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.

Поступила в Редакцию 3.08.95

УДК 536.24

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ ВВЭР

Жуков Ю.М., Романцов Г.Е. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Современные компьютерные коды для анализа безопасности ВВЭР включают в себя блок расчета условий возникновения кризиса теплоотдачи в пучках стержневых твэлов. В каждом из них по-разному вычисляется критическая плотность теплового потока с применением эмпирических корреляций, наиболее подходящих для конкретной конструкции ТВС. Однако имеющиеся рекомендации, как правило, пригодны лишь в ограниченном диапазоне геометрических и режимных параметров. По этой причине,

например, в коде RETRAN используются несколько корреляций, имеющих лучшие статистические характеристики в определенном диапазоне по давлению [1]. Для $p > 10,3$ МПа реализована корреляция В&W2. В интервале 8,96—10,3 МПа применяется интерполяция данных по формулам В&W2 и Барнетта. Для диапазона 6,9—8,96 МПа расчет проводится по формуле Барнетта. В интервале 5—6,9 МПа применяется интерполяция данных по формулам Барнетта и модифицированной формуле Барнетта. Для $p < 5$ МПа используется модифицированная формула Барнетта. Корреляция В&W2 основана на экспериментальных данных о кризисе теплоотдачи в пучках стержневых твэлов с равномерным энерговыделением по высоте. Корреляция Барнетта разработана для кольцевых каналов в ограниченном диапазоне давления 6,9 МПа, модифицированная формула Барнетта — для вертикального охлаждения пучков стержневых твэлов.

В коде TRAC применяется корреляция Биизи, полученная при обобщении данных о кризисе теплоотдачи в трубах и кольцевых каналах, в RELAP5/MOD3 и CATHARE — канадский вариант «скелетных таблиц» для трубы [2].

Естественно, что такому выбору предшествует верификация зависимостей путем сравнения с базой данных. В частности, в работе [3] представлены результаты сравнения шести наиболее известных зарубежных корреляций для расчета условий возникновения кризиса теплоотдачи в ТВС PWR и BWR (использованы 11 тыс. точек базы данных Колумбийского университета).

В качестве аналога в отечественной практике обоснования теплотехнической безопасности ВВЭР можно сослаться на отчеты НИКИЭТа [4] и ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т» [5]. Результаты первой публикации за давностью лет нуждаются в обновлении, вторая работа проведена на ограниченном экспериментальном материале с «локальными» значениями массовой скорости и равновесного паросодержания (всего 1675 точек базы данных РНЦ «Курчатовский ин-т»). Из четырех рассмотренных формул в упомянутой работе лишь рекомендация В.С. Осмачкина применяется в России. Таким образом, можно говорить об ограниченности информации в периодических изданиях по данному вопросу. Настоящая статья направлена на устранение этого недостатка. За исходный пункт сравнительного анализа взяты корреляции, разработанные в свое время тремя ведущими организациями для обоснования теплотехнической безопасности ВВЭР.

Методика РНЦ «Курчатовский ин-т» (формула В.С. Осмачкина) [6]. Критическая плотность теплового потока в ВВЭР, РБМК, АСТ, ВПБР рассчитывается по формуле

$$q_{кр}(z) = k_{\Pi} f_1 f_4 G^{0,2} [f_3 f_5 f_2 G^{0,4} x(z)] / \{1 + F[q(z')/q(z)]/3,54\},$$

где k_{Π} — коэффициент, учитывающий теплогидравлическую неравноценность ячеек пучка. В одномерных расчетах он равен 1, поперечных — 1,21. Функциями f_1 — f_4 учитывается влияние свойств теплоносителя на $q_{кр}$ в зависимости от давления; f_5 — оптимизационный коэффициент, который для ТВС РБМК равен 0,94 и 1 — в остальных случаях; G — массовая скорость, кг/(м²·с); $x(z)$ — равновесное паросодержание; $F[q(z')/q(z)]$ — фактор формы, учитывающий высотную неравномерность тепловыделения; z — продольная координата.

Методика оптимизирована на данных, полученных в экспериментальных исследованиях пучков стержней с моделированием дистанционирующих решеток ВВЭР, РБМК-1000, АСТ и обеспечением условий возникновения кризиса теплоотдачи непосредственно перед ними. Поскольку в реакторах указанного типа решетки спроектированы с соблюдением требований минимально возможного воздействия на поток и с учетом достаточной удаленности предыдущей решетки от места кризиса, можно утверждать, что их вклад в формирование условий возникновения кризиса теплоотдачи в рассматриваемых экспериментах несуществен. Формула применима в диапазоне геометрических и режимных параметров, приведенных в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Границы применимости эмпирических корреляций для расчета кризиса теплоотдачи в пучках стержней

Характеристика	РНЦ «Курчатовский ин-т»	НИКИЭТ	ОКБ «Гидропресс»
Тепловой диаметр пучка, мм	6—19	3,16—18,45	—
Обогреваемая длина пучка, м	0,5—7	0,45—7	1,7—3,5
Давление, МПа	1—19	2,9—19,6	7,45—16,7
Массовая скорость, кг/(м ² ·с)	200—4000	350—5000	700—3800
Равновесное паросодержание	<0,85	—0,3—0,6	0—0,4

Методика НИКИЭТа (формула В.Н. Смолина) [7]. По этой методике критическая плотность теплового потока $q_{кр}$ рассчитывается по трем формулам в зависимости от режима движения пароводяной смеси. В области перехода пузырькового кипения в пленочное $q_{1кр} = 0,024 B_1 G^{1/3} (1-x)^n K_n (1+F_p)$, где $n = 1,3$ для $x < 0$; $n = 0,7$ для $x > 0$; K_n — коэффициент, отражающий теплогидравлическую неравноценность по сечению ТВС; F_p — функция влияния дистанционирующих решеток на $q_{кр}$.

В режиме кольцевого движения двухфазного потока $x_{кр} = (1 - x_{кр})^{0,5} B_2 \exp(B_3 q_{кр})^{-1} G^{-0,5} K_n (1+F_p)$.

Для дисперсного режима движения пароводяной смеси кризис теплоотдачи в условиях орошения рассчитывается по формуле $q_{кр} = 0,83 B_4 G^{1/3} (1-x) K_n (1+F_p) / [x(j' - j'') + j'']^{2/3}$, где B_1 — B_4 — комплексы, отражающие влияние свойств воды и пара.

Из-за громоздкости эти комплексы в статье не приводятся. При заданном давлении и массовой скорости границы применения каждой формулы определяются точками их взаимного пересечения. Методика оптимизирована на 4033 экспериментальных точках (см. табл. 1).

Методика ОКБ «Гидропресс» (формула Ю.А. Безрукова) [8]. Для расчета по этой методике используется формула, определяющая критическую плотность теплового потока $q_{кр}$ в равномерно обогреваемых пучках стержней ТВС ВВЭР в виде $q_{кр} = 0,795(1-x)^{0,105p-0,5} G^{0,311(1-x)-0,127} (1-0,0185 p)$. Формула применима в диапазоне геометрических и режимных параметров, приведенных в табл. 1.

Базовое обеспечение расчетов. В России первый банк по кризису теплоотдачи в пучках стержней был создан в 1976 г. в НИКИЭТе. В ходе эксплуатации в ИАЭ им. И.В. Курчатова он был дополнен экспериментальными данными, полученными на стенде КС в результате исследований, ведущихся с 1968 г. на моделях ТВС ВВЭР, РБМК-1000, -1500. В 1983 г. был создан банк ТФЛ, включающий исключительно экспериментальные данные со стенда КС. В 1988 г. банк НИКИЭТ—ИАЭ и ТФЛ были объединены в один, в настоящее время насчитывающий 7245 экспериментальных точек [9]. Организация банка позволяет вычислять суммарные статистические характеристики приведенных корреляций путем сопоставления с экспериментом.

В настоящей работе из всего массива точек отобраны режимы с равномерным распределением энерговыделения по радиусу и высоте ТВС с тем, чтобы исключить влияние фактора формы поля. Всего таких режимов оказалось 3351 (табл. 2, вариант А). В первом варианте расчет проводился без учета границ применимости той или иной корреляции. Подобная формальная процедура давала возможность выявить слабые места рассматриваемых рекомендаций. Во втором варианте из данного массива вырезалась часть, в которой режимные параметры ограничены диапазоном для ВВЭР. Таких режимов оказалось всего 903 (табл. 3, вариант Б). В табл. 4 приведен диапазон изменения режимных параметров для обеих выборок из базы данных ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т».

Т а б л и ц а 2. Геометрические характеристики сборок, выбранных из базы данных РНЦ «Курчатовский ин-т» для анализа работоспособности наиболее известных корреляций по кризису теплоотдачи в пучках стержней (вариант А)

Сборка	Длина, м	Число стержней	Число решеток	Диаметр стержней, мм	Тепловой диаметр, мм	s/d	Число режимов	Тип обечайки
КС-1	2,5	19	10	9	11,2	1,356	191	Шести-гранная
-2	2,5	7	10	9	11	1,356	28	—
-3	2,5	19	10	9	11,2	1,356	160	—
-4	2,5	19	10	9	10,9	1,356	243	—
-31	2,5	19	7	13,5	22,9	1,519	88	—
-32	2,5	19	8	13,5	15,1	1,322	43	—
ЭНИН-62	1	7	4	9	11,8	1,356	88	—
-70	1,8	7	7	9	11,8	1,356	40	—
-72	2,5	7	10	9	12,3	1,356	19	Круглая
-73	2,5	7	10	9,1	12	1,341	72	Шести-гранная
ОКБ «Гидро-пресс»-61	2,5	7	10	9,1	11,5	1,341	118	—
-67	3,5	7	14	9,1	12,6	1,382	54	—
-71	1,75	7	7	9	13	1,395	70	—
-74	1,75	7	7	9,1	12,8	1,391	152	—
-75	2,5	7	10	9,1	12,6	1,382	162	—
ОКБМ-40	1	19	6	5,8	4,1	1,207	68	—
-41	1	7	6	5,8	3,2	1,155	47	—
-42	1	7	6	5,8	4	1,207	259	—
-46	1	7	5	5,8	5,3	1,207	116	Круглая
-48	1	7	6	5,8	3,3	1,155	78	Шести-гранная
-52	1	7	5	5,8	4	1,207	104	—
-53	1	7	6	5,8	4	1,207	312	—
-58	1	7	6	5,8	4	1,207	210	—
-77	1	7	6	5,8	3,2	1,155	127	—
-78	1	7	5	5,8	3,2	1,155	401	—
ФЗИ-60	0,9	7	4	5	7,1	1,4	101	—

Т а б л и ц а 3. Сборки, выбранные из базы данных РНЦ «Курчатовский ин-т» для анализа работоспособности наиболее известных корреляций по кризису теплоотдачи в пучках стержней в интервале параметров ВВЭР (вариант Б)

Сборка	Длина, м	Число стержней	Число решеток	Диаметр стержней, мм	Тепловой диаметр, мм	s/d	Число режимов	Тип обечайки
КС-1	2,5	19	10	9	11,2	1,356	120	Шести-гранная
-2	2,5	7	10	9	11	1,356	28	—
-3	2,5	19	10	9	11,2	1,356	65	—
-4	2,5	19	10	9	10,9	1,356	58	—
-31	2,5	19	7	13,5	22,9	1,519	4	—
ЭНИН-70	1,8	7	7	9	11,8	1,356	29	—
-72	2,5	7	10	9	12,3	1,356	13	Круглая
-73	2,5	7	10	9,1	12	1,341	55	Шести-гранная
ОКБ «Гидро-пресс»-61	2,5	7	10	9,1	11,5	1,341	118	—
-67	3,5	7	14	9,1	12,6	1,382	52	—
-71	1,75	7	7	9	13	1,395	65	—
-74	1,75	7	7	9,1	12,8	1,391	137	—
-75	2,5	7	10	9,1	12,6	1,382	159	—

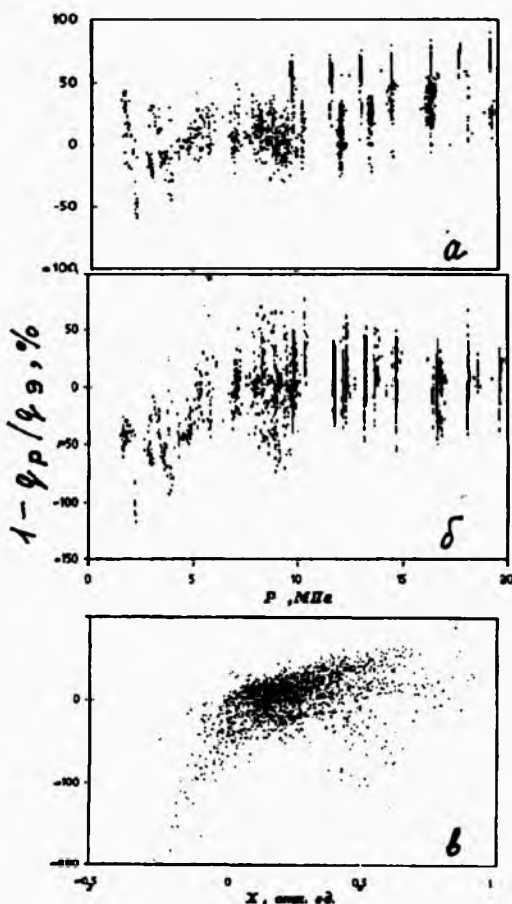
Т а б л и ц а 4. Диапазон изменения режимных параметров для двух выборок из базы данных ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»

Вариант	Давление, МПа		Массовая скорость, кг/(м ² ·с)		Паросодержание	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс
А	1,51	19,9	172	5040	-0,76	0,94
Б	7,5	16,9	714	3720	0	0,4

Т а б л и ц а 5. Статистические характеристики корреляций, используемых для обоснования теплотехнической безопасности ВВЭР

Вариант	Погрешность определения $1 - q_p/q_s$, %	Формула			
		В.С. Осмачкина [6]	В.Н. Смолина [7]	Ю.А. Безрукова [8]	Ю.А. Безрукова с оптимизированными коэффициентами
А	Средне-арифметическая	37,3	1,6	-0,2	0
	Дисперсия	27,3	23,8	53,2	20,2
Б	Средне-арифметическая	15,2	-1,7	-4,5	0
	Дисперсия	17,0	18,1	16,7	15,1

Результаты сопоставления. В табл. 5 приведены результаты, позволяющие судить о работоспособности трех корреляций, используемых для обоснования теплотехнической безопасности ВВЭР. Лучшей оказалась формула В.Н. Смолина. На рисунке приведены некоторые данные по трем методам. Видны области, где эксперименты описываются с большой погрешностью. Значительное (до 37%) занижение расчетной величины (q_p/q_s) в варианте А по формуле В.С. Осмачкина объясняется, по-видимому, некорректным учетом влияния обогреваемой длины на $q_{кр}$, так как выпадают укороченные пучки стержней ФЭИ и ОКБМ ($L = 0,9 - 1$ м). Кроме того наблюдается тенденция к значительному влиянию давления на погрешность расчета (см. рисунок, а). В варианте Б эта формула также уступает двум остальным, оставаясь наименее точной. На основании результатов сравнения авторами была предпринята попытка модернизировать наиболее простую из рассмотренных корреляций (Ю.А. Безрукова [8]), улучшив ее суммарные статистические характеристики за счет подбора нового комплекта эмпирических коэффициентов. Новые коэффициенты для всего рассматриваемого массива данных в равномерно обогреваемых пучках стержней ВВЭР приведены в табл. 6. Последний столбец в табл. 5 свидетельствует о преимуществе модернизированного варианта формулы Ю.А. Безрукова перед тремя остальными.



Погрешность обобщения экспериментальных данных о критической плотности теплового потока в пучках равномерно обогреваемых стержней по формуле В.С. Осмачкина (а), В.Н. Смолина (б), Ю.А. Безрукова (в)

Т а б л и ц а 6. Эмпирические коэффициенты в формуле Ю.А. Безрукова

исходный	Коэффициент	
	оптимизированный по варианту	
	А	Б
0,795	0,27	0,835
1	1,31	1,29
0,105	0,1	0,4
0,5	0,13	2,63
0,184	0,3	0,126
0,311	0,09	0,15
1	0,77	1,09
0,0185	0,02	0,04

Возможно, подобную операцию можно попытаться провести и с формулами В.С. Осмачкина и В.Н. Смолина. Однако, по нашему мнению, некоторое улучшение их статистических характеристик не сможет компенсировать простоту методики ОКБ «Гидропресс». Значительная среднеквадратичная относительная погрешность определения кризиса теплоотдачи в равномерно обогреваемых пучках стержней ВВЭР объясняется не только несовершенством рассмотренных корреляций, но и реальным разбросом экспериментальных данных, полученных на различных теплофизических стендах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Groeneveld D., Cheng S., Doan T. 1986 AECL—UO critical heat flux lookup table. — Heat Transfer Engng, 1986, v. 7, № 1—2.
3. Lellouche G. The boiling transition. Analysis and data comparisons. — Nucl. Engng Design, 1989, v. 116, № 2.
4. Смолин В.Н., Шпанский С.В., Поляков В.К. Методика расчета кризиса теплоотдачи в пучках гладких стержней. Отчет НИКИЭТ, 1977, инв. № 26.758.
5. Кобзарь Л.Л., Суслов А.И., Махов Д.Ю. Ячейковый банк экспериментальных данных по кризису теплоотдачи при кипении воды в пучках стержней. Отчет ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т», 1989, инв. № 32/1-374-89.
6. Кобзарь Л.Л., Суслов А.И. Верификация модели расчета критических тепловых потоков в программе RELAP5/MOD3 на основании банков данных. Отчет ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т», 1992, инв. № 32/1-1868-92.
7. Смолин В.Н., Шпанский С.В., Поляков В.К. Методика расчета кризиса теплоотдачи при кипении теплоносителя в стрежневых сборках. — В кн.: Семинар ТФ-78, Будапешт, 1978.
8. Безруков Ю.А., Астахов В.И., Брантов В.Г. и др. Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реактора ВВЭР. — Теплоэнергетика, 1976, № 2, с. 80—82.
9. Кобзарь Л.Л., Суслов А.И., Махов Д.Ю. Вторая версия банка ИАЭ опытных данных по кризису теплоотдачи. Отчет ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т», 1988, инв. № 32/1-3, часть 1, 2.

Поступила в Редакцию 31.08.95

УДК 531.787(088.8)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ ГАЗА В ТВЭЛАХ РЕАКТОРОВ

*Пастушин В.В., Новиков А.Ю., Зеленчук А.В., Бибилашвили Ю.К.
(ГНЦ РФ — ВНИИНМ им. А.А. Бочвара)*

Целью настоящей научно-исследовательской работы явилась разработка метода и технических средств для оперативного неразрушающего контроля герметичности и параметров газа как твэлов и ТВС энергетических реакторов в процессе их производства на заводе-изготовителе, так и отработавшего топлива в условиях горячей камеры, бассейна выдержки или хранилища.