

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко П.П. История исследований в области прямого преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения. — В кн: Государственный научный центр РФ — Физико-энергетический институт. 50 лет. М., ЦНИИатоминформ, 1996, с. 40—58.
2. Горновой Г.А., Горин Н.В., Кошмяков В.П. и др. Опыт эксплуатации быстрых импульсных ядерных реакторов БАРС 1, 2, 3 во ВНИИТФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, вып. 2. Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1994, с. 3—12.
3. Кононов В.Н., Боховко М.В., Дьяченко П.П. и др. Эксперимент по ядерной накачке аргон-ксенонового лазера на импульсном реакторе БАРС-6: Препринт ФЭИ-2476, 1995.
4. Барзилов А.П., Боховко М.В., Гулевич А.В. и др. Физические характеристики экспериментов по ядерной накачке газовых лазеров на импульсном реакторе БАРС-6: Препринт ФЭИ-2650, 1997.
5. Dyachenko P.P., Gulevich A.V., Zrodnikov F.V. et al. Energy model of a pulse nuclear reactor pumped laser system. — In: Proc. of ICENES'93. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1994. p. 372—376.
6. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В. и др. Энергетический макет лазерной системы с накачкой от импульсного реактора. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 5, с. 361—365.
7. Прохоров Ю.А., Кононов В.Н., Кувшинчиков В.И. и др. Исследования биологического действия импульсного нейтронного излучения реактора БАРС-6. — Там же, 1998, т. 85, вып. 5, с. 391—400.
8. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Прохорова Л.И. и др. Измерение времени жизни мгновенных нейтронов статистическим частотным методом в системе реактор БАРС-6—лазерный блок. — Там же, 1999, т. 87, вып. 5, с. 370—375.
9. Snopkov A.A., Gorin N.V., Gornovoi G.F. et al. Two-core fast reactor BARS-5. — In: Proc. Topical Meeting on Physics, Safety and Applications of Pulse Reactors. Washington, Nov. 13—17, 1994, p. 300—306.
10. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М: Атомиздат, 1976.
11. Hansen G. Assembly of fissionable material in presence of a weak neutron source. — Nucl. Sci. Engng, 1960, v. 8, № 6, p. 709—719.
12. Баладин А.Ф., Дьяченко П.П., Котов К.М. и др. Измерение параметров импульса делений реактора БАРС-6: Препринт ФЭИ-2591, 1997.

Поступила в Редакцию 12.04.2000

УДК 536.24

МЕТОД РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В СМЕШАННЫХ СБОРКАХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ТАБЛИЦ ДЛЯ КРИЗИСА В ПУЧКАХ

Бобков В.П. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

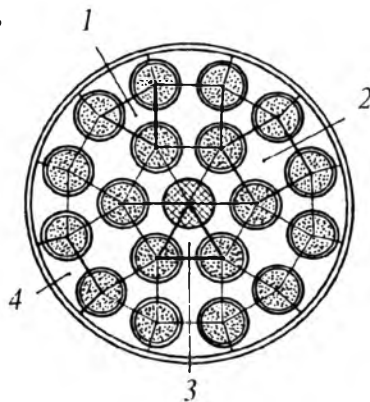
Традиционные методы расчета критических тепловых потоков основаны на рекомендациях, полученных в результате экспериментальных исследований натурных моделейборок. В качестве определяющих в таких методах задаются усредненные в данном сечении геометрические и режимные параметры: давление, массовая скорость, балансное паросодержание. Цель настоящей статьи — обоснование метода расчета критических тепловых потоков в сборках со смешанным расположением тепловыделяющих стержней, основанного на использовании таблицы для критических тепловых потоков в треугольных пучках стержней.

Разработанные к настоящему времени программы (см., например, ПУЧОК-2 [1] или VEVERKA [2] и др.) позволяют рассчитывать локальные (в каждой макроячейке) теплогидравлические параметры. Под макроячейками понимается часть проходного сечения сборки, заключенная между соседними стержнями или между стержнями и обечайкой. Для определения запаса до кризиса теплообмена требуется знать зависимость критического теплового потока от локальных режимных и геометрических параметров каждой макроячейки. Предлагаемый в статье метод позволяет рассчитывать критические тепловые потоки, если локальные параметры известны. Метод пригоден и для оценки критических тепловых потоков при неравномерном по сечению энерговыделению, и для периферийных ячеек, и для деформированныхборок.

Каналы РБМК, для которых (или подобных) и разработан этот метод, имеют особенности. Основные из них следующие: макроячейки различаются теплогидравлическими параметрами вследствие различия теплового диаметра и форм (геометрии) сечения, используются специальные интенсификаторы; каналы длинные (7 м), поэтому влияние входных устройств мало или отсутствует.

Сечение канала РБМК можно разбить на макроячейки разной геометрической формы (см. рисунок), характерные для треугольного 1, четырехугольного пучка стержней 2 и ячеек периферийных зон разной геометрии 3, 4. Для поясечного подхода, строго говоря, необходимо иметь метод расчета критических тепловых потоков в таких макроячейках.

Ранее было показано, что таблицы [3, 4] для критических тепловых потоков в треугольных сборках стержней можно использовать для определения критических тепловых потоков в макроячейках не только трех- и четырехугольных сборок, но и других форм, например, в периферийных. При этом необходимо учитывать поправки, предлагаемые в настоящей статье и в работе [4], полученные на основании экспериментальных данных и расчетов по модели элементарных тепловых ячеек [5, 6]. В рассматриваемом методе предполагается, что критический тепловой поток зависит только от локальных параметров, длина обогрева не имеет значения. На него немного влияет относительное расстояние от входа в сборку до рассматриваемого сечения. Преимущества метода: предельно широкие области параметров, плавность изменения критического теплового потока, наглядность, высокая надежность и точность, удобство в расчетах.



Макроячейки в сечении канала РБМК

Предлагаются два пути применения метода: поясечный расчет и использование усредненных по сечению параметров. Первый путь пригоден для РБМК и других типовборок. Порядок расчета критических тепловых потоков в смешанных сборках стержней следующий. Сечение канала разбивается на макроячейки. Определяется тепловой диаметр для каждой макроячейки как отношение учетверенной площади ее поперечного сечения к обогреваемому периметру. Для внутренних макроячеек задается относительный шаг расположения стержней (s/d , где s — расстояние между осями стержней; d — диаметр стержня), для периферийных макроячеек — условный относительный шаг, который может быть определен как отношение радиуса стержня r плюс минимальный зазор δ в проходном сечении данной макроячейки к радиусу стержня $(s/d)^* = (\delta_{\min} + r_0)/r_0$. Для учета влияния входных условий задается относительное расстояние от входа в сборку L/d_h , где L — расстояние до входа в сборку; d_h — тепловой диаметр. Используя программы, например, [1, 2], рассчитывают массовую скорость и энтальпию теплоносителя по макроячейкам. Методика должна учитывать перемешивание потока по сечению сборки. Зная давление, массовую скорость и паросодержание по всем макроячейкам, по таблице [3, 4] определяют предварительный (базовый) критический тепловой поток для каждой макроячейки. Далее находят окончательный критический тепловой поток в каждой макроячейке канала $Q_{\text{кр.яч}}$ с учетом поправок на тепловой диаметр $F_1(d_h)$, относительный шаг $F_2(s/d)$, расстояние от входного сечения до рассматриваемого сечения (чаще всего это есть обогреваемая длина) $F_3(L)$ и характеристики дистанционирующей решетки $F_4(K_f)$:

$$Q_{\text{кр.яч}} = Q_{\text{таб}}(P, G, X, d_h = 9,36, s/d = 1,4) F_1(d_h) F_2(s/d) F_3(L) F_4(K_f),$$

где $Q_{\text{таб}}(P, G, X, d_h = 9,36 \text{ мм}, s/d = 1,4)$ — критический тепловой поток при $s/d = 1,4$, $d_h = 9,36 \text{ мм}$.

Поправочные функции имеют следующий вид:

$$F_1(d_h) = (d_h / (d_h = 9,36 \text{ мм}))^{-1/3};$$

$$F_2(s/d) = 0,82 - 0,7 \exp[-35(s/d - 1)] \text{ при } s/d \leq 1,1;$$

$$F_2(s/d) = 0,2 + 0,57 s/d \text{ при } s/d > 1,1 \text{ до } 1,52;$$

$$F_3(l) = 1,0 + 0,6 \exp(-0,01 L/d_h);$$

$$F_4(K_f) = 1 + 1,5 K_f^{0,5} (G/1000)^{0,2} \exp(-0,1 L_{sp}/d_h),$$

где L_{sp} — расстояние от выходного сечения (или места кризиса) до ближайшего дистанционирующего устройства; K_f — коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующего устройства.

С учетом этих функций метод может быть использован для расчета критических тепловых потоков в пучках при тепловом диаметре макроячеек 2,8—21 мм, относительном шаге 1,02—1,52, давлении 0,1—20 МПа, массовой скорости 50—5000 кг/(м²·с), локальном балансном паросодержании от -0,5 до 0,9, относительном расстоянии от входа в сборку $L/d_h \geq 40$.

Критические тепловые потоки во всех макроячейках и по всей длине канала сравниваются с заданными тепловыми потоками и решается вопрос: достаточен ли запас до кризиса.

Ошибки описания экспериментальных данных табличным методом оценены в [3, 4] для треугольных пучков — интегральная средняя погрешность по выходным параметрам (по всему массиву данных 5000 точек) не превышает 2%, среднеквадратичный разброс данных — 19%. При обработке по входным параметрам эти оценки составляют 1 и 8% соответственно. Таковы же ошибки для четырехугольных пучков. По-видимому, такие же ошибки будут и для периферийных макроячеек.

Второй путь рекомендуется для каналов РБМК, снабженных интенсификаторами разной конструкции. Учет их влияния возможен при наличии экспериментальных данных. Интенсификаторы перемешивают поток по сечению сборки, и поэтому логично строить расчет на основе усредненных по сечению параметров. Этот путь использования метода полезен для каналов с конкретными конструкциями дистанционирующих решеток-интенсификаторов.

Необходимо было решить две задачи: 1) ввести поправку на теплогидравлическую неравноценность макроячеек (при первом способе этого не требуется) и 2) уточнить влияние дистанционирующих решеток-интенсификаторов $F_4(K_f)$. Для этого привлечен массив экспериментальных данных банка ФЭИ, полученных для сборок РБМК. Массив содержит 705 экспериментальных точек, охватывающих давление 6—10 МПа, массовую скорость 750—1200 кг/(м²·с), балансное паросодержание 0,2—0,9, диаметр стержней 13,5, относительный шаг стержней 1,19, длину сборок 7 м (обечайка круглого сечения). В массиве имеются сборки с тепловым диаметром 13,42 и 11,9 мм. Тепловой диаметр треугольной макроячейки 7,59 мм, четырехугольной — 10,78 мм. Массив содержит экспериментальные данные, полученные как без дистанционирующих устройств и турбулизаторов, так и при их наличии.

Поправку на тепловую неравноценность сборки вводим следующим образом. В массиве имеются экспериментальные данные, свидетельствующие об отсутствии влияния дистанционирующей решетки-интенсификатора на критический тепловой поток (26 точек). Эти данные были использованы для получения новой поправки на теплогидравлическую неравноценность ячеек сборки. За показатель неравноценности ячеек в первом приближении принимаем отношение теплового диаметра минимальной макроячейки к усредненному по сечению тепловому диаметру ($K_{тр}$ — критерий теплогидравлической разверки): $K_{тр} = (d_h)_{\min}/(d_h)_{\text{ср}}$. Для части исследованных сборок $K_{тр} = 7,59/13,42 = 0,56$, для другой — 0,64. Поправку на теплогидравлическую раз-

верку (тепловую неравноценность) можно описать зависимостью $F_{тр} = AK_{тр} = 1,35K_{тр}$. Сравнение с массивом экспериментальных данных показало нулевое среднее отклонение и среднеквадратичную погрешность 6% по выходным параметрам.

Поправка на влияние дистанционирующих решеток и интенсификаторов после оптимизации имеет вид

$$F_{тр} = F_4(K_f) = 1 + [1,5K_f^{0,5}(G/1000)^{0,2} \exp(-0,1 L/d_h) V(X)].$$

Здесь за основу принято соотношение (5) из работы [7], в которое введена дополнительная поправочная функция $f(X)$, где X — балансное паросодержание: $f(X) = 1 + 7X^2$. Эта поправка получена по всему массиву данных для РБМК. Она отражает общие для всех сборок закономерности влияния дистанционирующих решеток на критический тепловой поток. Сравнение с результатами экспериментов по всему массиву данных показало, что при числе точек 705 средняя ошибка составляет 1%, среднеквадратичная — 19,7%.

В использованном массиве данных конструкции решеток-интенсификаторов различны, поэтому их влияние на критический тепловой поток разное. Для учета влияния были подобраны для каждого исследования некоторые коэффициенты $F_{р.и}$, уточняющие расчет. В таблице приведены значения этих индивидуальных коэффициентов, которые следует использовать в соотношении для расчета критического теплового потока по соотношению $Q_n = Q_{таб} K_1 K_2 K_3 K_4 F_{тр} F_{р.и}$.

Статистические данные для критических тепловых потоков в каналах РБМК
(сравнение расчетов с экспериментальными данными)

Условный номер работы в банке данных	Число точек	$F_{р.и}$	Среднеквадратичная ошибка по выходным параметрам, %
i002	70	1,19	16,7
i003	30	1,26	4,6
i005	34	1,17	15,0
i006	66	0,90	9,2
i008	10	1,16	17,8
i009	64	1,05	29
i010	47	1,22	15
i012	35	1,05	12
i013	37	0,96	12
i014	8	1,16	10
i015	16	1,17	10
i016	38	0,74	40
i017	9	1,07	5
i023	34	0,81	7
i024	25	0,92	7
i510	60	0,77	8,5
i511	26	0,98	6
i513	19	1,37	12
i515	12	0,85	13
i517	31	0,93	11
i518	26	1,12	6

Таким образом, показана возможность использования таблиц критических тепловых потоков в треугольных пучках стержней в расчетах критических тепловых потоков в сборках стержней смешанного типа. Метод рекомендуется для областей параметров, как обеспеченных экспериментальными данными, так и для более широких, где данные отсутствуют. Он расширяет возможности конструкторов при решении задач теплогидравлической оптимизации активной зоны реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Ю.В., Разина Н.С., Шпанский С.В. ПУЧОК 2Б — программа для теплогидравлического анализа двухфазных потоков в стержневых сборках с учетом неомогенной структуры поперечного потока смешения. Доклад на семинаре СЭВ. Будапешт, ЦИФИ. 1978, т. 2, с. 761—774.
2. Коштылек Я., Свитах Ф. Оценка моделей для поперечного массо- и энергообмена при анализе по ячейкам пучков тепловыделяющих стержней. — Там же, с. 774—790.
3. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л. и др. Критический тепловой поток в треугольных пучках стержней (скелетные таблицы, версия 1997 года): Препринт ФЭИ-2603, 1998. 27 с.
4. Бобков В.П., Кириллов П.Л., Виноградов В.Н., Смогалева И.П. Табличный метод расчета критического теплового потока в водоохлаждаемых треугольных сборках стержней. — Атомная энергия, 1999, т. 87, вып. 1, с. 17—24.
5. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зяткина О.А., Козина Н.В. Метод описания кризиса в каналах сложного поперечного сечения. — Теплоэнергетика, 1995, № 3, с. 37—46.
6. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зяткина О.А., Козина Н.В. Относительное описание кризиса в сборках стержней и других сложных каналах. — Там же, 1997, № 3, с. 1—7.
7. Groeneveld D., Joobor J., Leung L. e.a. The effect of fuel subchannel geometry on CHF. — In: Proc. NURETH-5, Salt Lake City, 1992, v. 3, p. 683—690.

Поступила в Редакцию 1.03.2000

УДК 621.039.542.34:621.039.526+621.039.546

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ТОРИЙСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

Курина И.С., Дворяшин А.М., Гудков Л.С (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

В ФЭИ проводятся научно-исследовательские работы, которые связаны с разработкой технологии изготовления торийсодержащих топливных композиций на основе диоксидов урана и плутония, пригодных для использования в тепловых или быстрых реакторах. Значительное внимание при этом уделяется получению порошков со свойствами, оказывающими определяющее влияние на качество спеченных таблеток [1—3].

На начальном этапе возможного вовлечения тория в кампании действующих реакторов возникает проблема повышения поглощения нейтронов. В связи с этим необходимо увеличить загрузку ^{235}U , что может привести к неравномерности энерговыделения в активной зоне. Во избежание этого необходимо компенсировать повышение поглощения нейтронов неполной загрузкой тория. Для этого рассматривается возможность использования инертных разбавителей. В процессе разработки технологии изготовления торийсодержащего топлива на основе диоксидов урана или плутония были опробованы варианты с введением в топливные композиции таких инертных разбавителей, как оксиды магния или кальция. В качестве разбавителей оксиды магния и кальция выбраны не случайно. В ФЭИ разработана технология изготовления оксидного плутонийсодержащего топлива с оксидом магния в качестве инертной матрицы [4, 5]. Использование оксида кальция в качестве инертного разбавителя или добавки в композицию основывается на том, что кальций повышает плотность ториевого топлива и увеличивает размер кристаллитов при производстве порошков [6].

Большой интерес проявляется к металлическому торью в качестве матричного материала в топливе. В связи с этим возникла необходимость изучения поведения тория при возможном контакте с разными теплоносителями.

Цель настоящей работы — определение оптимальных технологических режимов изготовления топливных композиций на основе $(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2$ без разбавителей и с разбавителями MgO или CaO , исследование взаимодействия этих композиций, а также металлического тория с теплоносителями (водой и натрием) в условиях, имитирующих разгерметизацию твэлов.