

непрерывная диффузионная очистка межэлектродного пространства ЭГК от неконденсирующихся примесей за счет односторонне направленного потока пара цезия;

возможность регулирования давления пара цезия за счет изменения давления неконденсирующегося газа в резервуаре газорегулируемой тепловой трубы, что обеспечивает безынерционное регулирование;

слабая зависимость от тепловой мощности, подаваемой в зону испарения, что значительно упрощает температурную стабилизацию рабочего режима преобразователя и упрощает температурную привязку к петлевому каналу термоэмиссионного ЭГК;

пространственное разделение пара и неконденсирующегося газа, что исключает потери цезия. В этих условиях появляется возможность по температуре адиабатической зоны и давлению неконденсирующегося газа определить давление пара цезия в рабочем объеме термоэмиссионного преобразователя (см. рис. 5).

Источник пара цезия на основе газорегулируемых тепловых труб позволит значительно упростить управление и стабилизацию выходных электрических параметров ЭГК. Его при-

менение повысит ресурс термоэмиссионных электрогенерирующих каналов за счет непрерывной диффузионной откачки межэлектродного пространства преобразователя от различных остаточных газов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием — «Ромашка» и «Енисей»). Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. М.: ИздАт, 2008. 146 с.
2. Ponomarev-Stepnoi N.N., Nikolaev Yu.V., Kucherov R.Yu. e.a. Comparative analysis of concepts of single-cell and multi-cell TFE of thermionic NPS. — In: Proc. AIP Conf. Albuquerque, 1993, p. 1347—1353.
3. Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе. — Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 6, с. 371—374.
4. Каландаришвили А.Г. Источники рабочего тела для термоэмиссионных преобразователей энергии. М.: Энергоатомиздат, 1993. 304 с.
5. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. М.: Энергоатомиздат, 2000. 380 с.

Поступила в Редакцию 22.03.11

УДК 621.039.576

### ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ КОДА RELAP5/mod3.2 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ КС

*Афремов Д.А., Яшиников Д.А. (ОАО «НИКИЭТ», г. Москва)*

Применительно к РБМК-1000 проведена верификация методики расчета кризиса теплоотдачи кода RELAP5/mod3.2. Модели, установленные на стенде КС (НИЦ «Курчатовский институт») и использованные для изучения кризиса в условиях РБМК в 1969—1974 гг., наиболее близки по своим характеристикам к натурным [1]. Для верификации использовали 290 экспериментальных точек, полученных на пяти участках.

Для расчета критического теплового потока в коде RELAP5/mod3.2 используется метод [2], который состоит в интерполяции критического теплового потока в пространстве трех переменных: давление, массовый расход и относительная энтальпия потока. Интерполяция осуществляется по таблице с экспериментальными дан-

ными для труб, приведенными к диаметру 8 мм. Таблица создана на основе 15 тыс. экспериментальных точек и представляет собой трехмерный массив из 4410 точек, 15 значений давления — 0,1—20 МПа, 14 значений массового расхода — 0—7500 кг/(м<sup>2</sup>·с) и 21 значения относительной энтальпии потока — -0,5—1. После интерполяции значение критического теплового потока умножается на поправочные коэффициенты, учитывающие влияние следующих факторов: диаметр трубы, отличие критического теплового потока для пучков стержней от критического теплового потока для труб, аксиальный профиль энерговыделения, изменение пограничного слоя на входе в пучок и за дистанционирующими решетками.

Есть более поздние версии скелетной таблицы для критического теплового потока, учитывающие в том числе различие в кризисах 1-го и 2-го рода [3—5]. Представляется целесообразным включение в расчетные коды модифицированных таблиц. К сожалению, даже в последних модификациях кода RELAP5 по-прежнему используется скелетная таблица 1986 г. Однако следует отметить, что поправочный коэффициент, учитывающий отличие критического теплового потока для пучков стержней от критического теплового потока для труб, оказывает большее влияние на расхождение расчетных и экспериментальных значений критического теплового потока, чем упомянутая скелетная таблица.

В экспериментах по изучению кризиса теплоотдачи использовали модель полномасштабной ТВС. Корпус давления, в который устанавливали электрообогреваемую модель прямого нагрева, был выполнен из трубы наружным диаметром 121 мм, толщиной стенки 6 мм из стали X18H10T. Внутри трубы расположен набор электроизоляционных втулок из талькохлорита — природного минерала. Внутренний диаметр втулки 80 мм, высота 120 мм.

Использованная в экспериментах модель состояла из 19 электрообогреваемых имитаторов твэлов, выполненных из трубок из стали марки X18H10T наружным диаметром 13,5 мм, толщиной стенок 3,5 мм, длиной (зоны тепловыделения) 7 м. Модель обогревали непосред-

ственным пропусканием по имитаторам твэлов постоянного электрического тока от тиристорных агрегатов. По всей длине зоны тепловыделения с шагом 350 мм располагались дистанционирующие решетки из стали X18H10T. Верхняя граница зоны тепловыделения совпадала с нижней кромкой самой верхней дистанционирующей решетки, нижняя граница — с нижней кромкой самой нижней.

Модель имела следующие геометрические характеристики: площадь проходного сечения 0,002307 м<sup>2</sup>, площадь поверхности теплоотдачи 5,641 м<sup>2</sup>, гидравлический диаметр 8,729·10<sup>-3</sup> м.

Индивидуальные особенности моделей ТВС приведены в табл. 1, диапазон изменения режимных параметров — в табл. 2.

Более подробное описание стенда, методики экспериментов и их результаты включены в банк данных о кризисе теплоотдачи, входящий в состав созданной в НИКИЭТе электронной библиотеки теплофизических баз данных [6].

**Результаты расчетов и их статистическая обработка.** На рисунке сопоставлены расчетные и экспериментальные критические тепловые потоки. Результаты статистической обработки приведены в табл. 3.

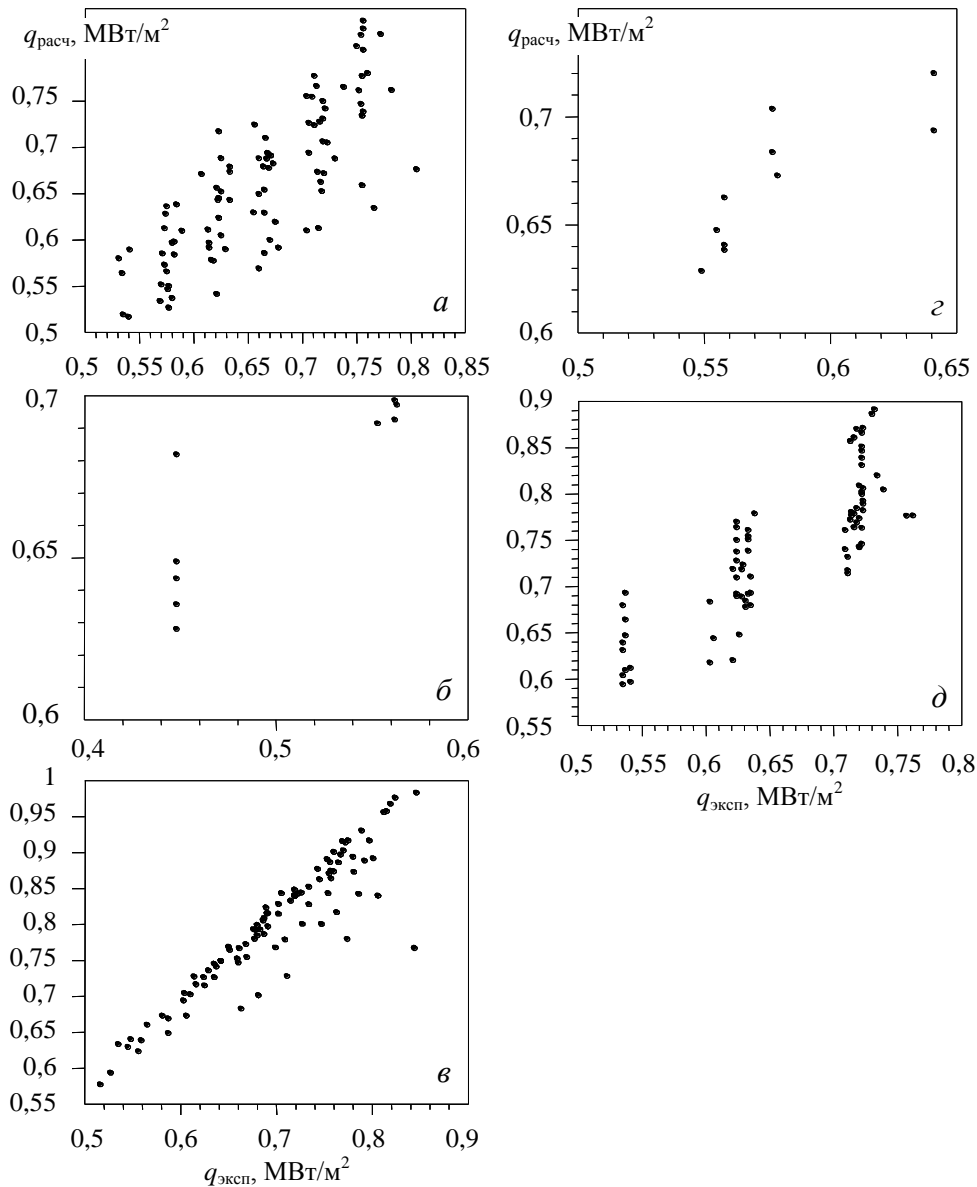
Видно, что для модели ТВС с треугольной упаковкой стержней код RELAP5/mod3.2 дает несмещенную оценку критического теплового потока, для ТВС со смешанной упаковкой стержней, как в РБМК, — систематическое превышение расчетного критического теплового

Т а б л и ц а 1. Индивидуальные особенности моделей ТВС

Номер сборки	Тип решетки	Число решеток	Профиль энерговыделения по длине сборки	Число точек
1	Треугольная	19	Равномерный	96
2	Смешанная (как в РБМК)	21	Неравномерный	9
3	Смешанная	21	Равномерный	97
4	»	21	Неравномерный	10
5	»	21	»	78

Т а б л и ц а 2. Диапазон изменения режимных параметров

Номер сборки	Давление, МПа	Расход, кг/с	Температура теплоносителя на входе, К	Тепловой поток, МВт/м <sup>2</sup>	Массовая скорость теплоносителя, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
1	6,8—10,3	3,25—7,17	501,6—539,8	0,531—0,805	1409—3107
2	6,5—7,5	3,38—4,58	513,8—530,8	0,448—0,563	1463—1983
3	6,5—9,2	4,44—8,23	524—545,9	0,516—0,786	1883—3651
4	6,9—7,4	3,47—5,07	505,7—535,9	0,549—0,641	1505—2200
5	6,1—8,6	3,25—6,03	454,6—541,1	0,535—0,762	1409—2613



Критический тепловой поток для сборки 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д)

Т а б л и ц а 3. Статистические характеристики результатов расчетов

Номер сборки	Среднее отношение экспериментального критического теплового потока к расчетному	Среднеквадратичное отклонение расчета от эксперимента
1	1,001	0,071
2	0,74	0,106
3	0,87	0,047
4	0,86	0,036
5	0,89	0,068

потока над экспериментальным. Этому можно дать следующее объяснение: в случае смешанной решетки имеет место большая неравномерность в распределении теплогидравлических

параметров в проходном сечении сборки, которая не учитывается в полной мере при расчете.

Для 194 точек, полученных на экспериментальных сборках 2—5 со смешанной решеткой, как в РБМК, среднее отношение расчетного теплового потока к экспериментальному составляет 0,874. Поправочный множитель  $k$  для учета снижения критического теплового потока в сборках РБМК за счет смешанной упаковки стержней можно приближенно положить равным этому среднему значению. Однако представляется целесообразным сделать интервальную оценку. Для этого необходимо воспользоваться формулой доверительного интервала для математического ожидания генеральной совокупности [7]

$$\bar{k} - t_p \sigma / \sqrt{n}, \bar{k} + t_p \sigma / \sqrt{n},$$

где  $\bar{k}$  — средний поправочный множитель;  $t_p$  — величина, которая зависит от заданного уровня надежности, числа экспериментальных точек и определяется с помощью статистических таблиц (см., например, [7]);  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение параметра  $k$ ;  $n$  — число экспериментальных точек.

С учетом этого  $\bar{k} = 0,874$ ,  $n = 194$ . При уровне надежности 0,95,  $n = 194$ ,  $t_p = 1,96$ . Если сделать предположение о линейной зависимости между расчетным критическим тепловым потоком и параметром  $k$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  коэффициента  $k$  равно среднеквадратичному отклонению расчетного теплового потока от экспериментального. Среднеквадратичное отклонение расчетного теплового потока от экспериментального может быть вычислено по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i - \Delta^2 / n},$$

где  $\delta = (q_{\text{эксп}} - q_{\text{расч}}) / q_{\text{эксп}}$ ;  $q_{\text{эксп}}$ ,  $q_{\text{расч}}$  — экспериментальный и расчетный критический тепловой поток соответственно;  $\Delta = \sum_{i=1}^n \delta_i / n$ ;  $n$  — число экспериментальных точек.

В результате  $\sigma = 0,076$ .

Доверительный интервал для поправочного множителя к расчетному критическому тепловому потоку с надежностью 0,95 равен 0,864—0,885. Этот интервал используется в качестве диапазона изменения для поправочного множителя к расчетному критическому тепловому потоку при статистическом анализе неопределенности параметров теплогидравлических расчетов [8, 9].

На основе анализа экспериментальных данных, полученных на стенде КС, сделан вывод о том, что для модели ТВС с треугольной упаковкой стержней код RELAP5/mod3.2 дает несмещенную оценку критического теплового потока, для моделей ТВС со смешанной упаковкой стержней, как в РБМК, — систематическое превышение расчетного критического теплового потока над экспериментальным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осмачкин В.С. Исследование теплогидравлических характеристик моделей топливных сборок реакторов в ИАЭ им. И.В. Курчатова. — В сб.: Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней в стационарных и нестационарных режимах теплообмена, 1974, с. 57—66.
2. Groeneveld D., Cheng S., Doan T. AECL-UO critical heat flux lookup table. — Heat Transfer Engng, 1986, v. 7, № 1—2, p. 46—62.
3. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Болтенко Э.А. и др. Скелетные таблицы по критическим тепловым потокам. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 1, с. 18—28.
4. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Грневельд Д. и др. Скелетная таблица версии 1995 г. для расчета критического теплового потока в трубах. — Теплоэнергетика, 1997, № 10, с. 43—53.
5. Кириллов П.Л., Терентьева М.И. Скелетные таблицы по расчету критического теплового потока в трубах для воды. История и версия 2006 г. — Атомная техника за рубежом, 2008, № 10, с. 3—18.
6. Журавлева Ю.В., Мингалеева Г.С., Мокроусов К.А., Яшников Д.А. Библиотека электронных баз теплофизических данных. — Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 3, с. 158—163.
7. Варден Б. Математическая статистика. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.
8. Афремов Д.А., Журавлева Ю.В., Миронов Ю.В., Радкевич В.Е. Методика статистического анализа неопределенностей теплогидравлических расчетов. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 2, с. 101—109.
9. Афремов Д.А., Журавлева Ю.В., Миронов Ю.В. и др. Анализ неопределенности расчетов аварий с потерей теплоносителя для 1-го энергоблока Курской АЭС. — Там же, 2005, т. 98, с. 422—428.

Поступила в Редакцию 17.03.11

УДК 621.039.524.2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЙ ИНЕРЦИИ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ С ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Дмитриев А.М., Кавун О.Ю., Мощенко М.Г., Синцов А.Е., Хренников Н.Н. (НТЦ ЯРБ, г. Москва),  
Денискин В.П. (НИИ НПО «Луч», г. Подольск, Московская обл.)

В настоящей статье излагаются результаты расчетного изучения специфических особенностей использования в ядерных реакторах

твердого вещества в качестве теплоносителя. Внутренние напряжения в теплопередающих элементах теплоносителя при теплопереносе и