

УДК 536.24:621.039.524.4

БАЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОГИДРАВЛИКЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ

Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Жуков А.В., Кузина Ю.А., Денисова Н.А., Сорокин Г.А., Федосова М.А.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)

В последнее время сформулирован новый комплекс повышенных требований к быстрым реакторам, самым высоконапряженным элементом которых является активная зона [1, 2]. Необходимо обосновать ее характеристики для номинальных и ненормальных режимов работы, их улучшение, оптимизацию, повышение надежности. Проведенные в ФЭИ расчетные исследования температурного поля ТВС реактора «Феникс» (Франция), отработавших кампанию, показали, что формоизменение элементов ТВС может привести к большим неравномерностям температурного поля теплоносителя, большим азимутальным неравномерностям температуры твэлов, значительному перегреву их оболочек в области локального нарушения геометрии решетки [3].

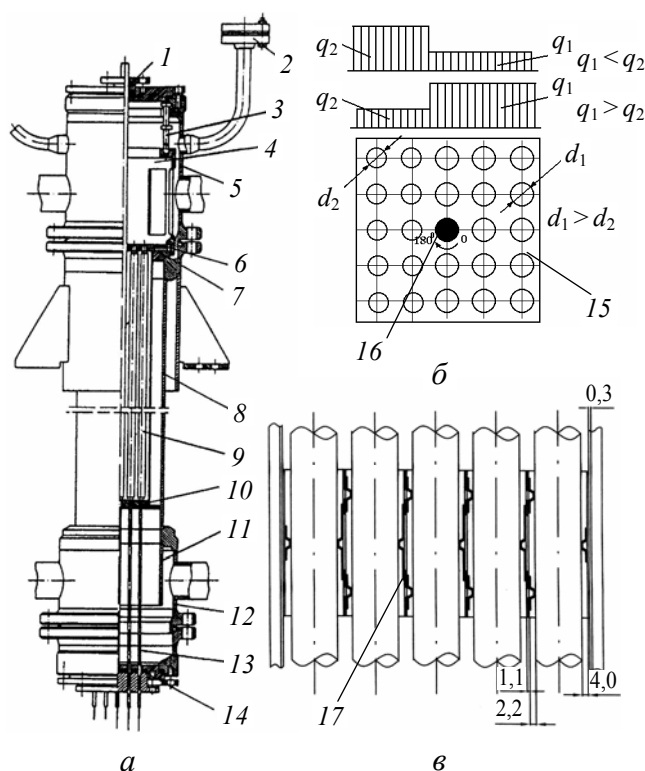
Для расчетного моделирования теплогидравлики активной зоны разработаны эффективные методики — модель пористого тела, показанная методика, моделирование локальных характеристик полей скорости температуры теплоносителя с учетом теплообмена с твэлами (решение сопряженной задачи теплообмена). К сожалению, почти все коды не верифицированы. Для этого прежде всего необходимы систематизация, анализ и оценка экспериментальных данных теплогидравлики активных зон при последующем формировании на этой базе верификационных теплогидравлических тестов и подготовке стандартных задач.

БЕНЧМАРК-ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ТЕПЛОГИДРАВЛИКЕ, ПРОВЕДЕННЫЕ В ФЭИ

Бенчмарк-эксперименты на модельной ТВС с жидкометаллическим теплоносителем. Экспериментальные исследования полей температуры и скорости проведены на модельной ТВС с неоднородной решеткой, которая образована из 25 имитаторов твэлов, расположенных в квадратной упаковке с относительным шагом $s/d_1 = 1,25$ и $s/d_2 = 1,46$ и представляющих собой две подзоны имитаторов твэлов с разным диаметром имитаторов ($d_1 = 14$, $d_2 = 12$ мм) и с разным тепловым потоком (q_1 и q_2 соответственно) [4] (рис. 1). Имитаторы размещены в прямо-

угольной обечайке, монтируемой в цилиндрическом корпусе. Имитаторы дистанционируются нижней и верхней центрирующими решетками и поперечной дистанционирующей решеткой, расположенной от начала энерговыделения на расстоянии 372 мм. Длина энерговыделения в сборке составляет $l_0 = 960$ мм.

Измерительный имитатор твэла выполнен поворотным в сальниковом уплотнении. На его поверхности в продольных пазах заделаны 12 микротермопар, расположенных с шагом по азимуту $\Delta\varphi = 30^\circ$. Другие имитаторы твэлов выполнены неподвижными. Нагреватели всех имитаторов представляют собой спирали из нихро-



Р и с. 1. Общий вид (а), поперечное (б) и продольное сечение (в) экспериментальной модельной ТВС: 1 — сальниковое уплотнение; 2 — вывод термопар; 3 — упорный болт; 4 — стакан; 5 — верхний коллектор; 6 — термопарная решетка; 7 — верхняя центрирующая решетка; 8 — корпус модели; 9 — имитаторы твэлов; 10 — нижняя центрирующая решетка; 11 — направляющий стакан; 12 — нижний коллектор; 13 — токоподвод; 14 — уплотнение токоподводов; 15 — квадратная обечайка (чехол); 16 — поворотный (измерительный) имитатор твэла; 17 — дистанционирующая решетка

мовой проволоки, обеспечивающие постоянный по высоте и периметру имитатора тепловой поток.

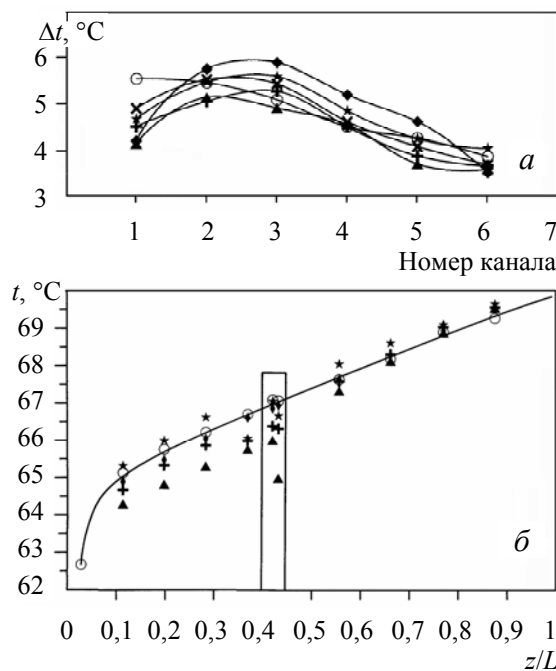
Дистанционирующая решетка представляет собой каркас из вставленных одна в другую пластин толщиной 1,2 мм (степень затеснения проходного сечения под теплоноситель $\varepsilon \approx 20\%$). Они образуют квадратные ячейки, к стенкам которых крепятся миниатюрные пружинные выступы, контактирующие с гладкими имитаторами твэлов и таким образом их дистанционирующие. В зоне периферийных ячеек к каркасу решетки крепятся по одному дистанционатору, расположенному посередине высоты решетки.

Температура теплоносителя на выходе из пучка имитаторов твэлов во всех ячейках модели измеряется микротермопарами в защитных капиллярах, монтируемых в терморешетке и вводимых в ячейки при ее наложении на верхнюю торцевую решетку модельной сборки. При этом их спаи располагаются по центрам отверстий на уровне нижней кромки решетки.

Тесты выполнены с использованием гидравлических кодов BRS-TVS.R (Россия) [5], SPIRAL, AQUA (Япония) [6], FLUENT (Испания) [7], STAR-CD (Нидерланды) [8], MATRA, CFX (Республика Корея) [9]. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных приведено на рис. 2 [10].

Исследования показали, что температура теплоносителя всегда выше в более затесненных ячейках, образованных имитаторами большего диаметра, независимо от изменения энерговыделения в подзонах. Таким образом, согласно экспериментам повышение температуры теплоносителя более чувствительно к геометрии сборки, чем к изменению тепловых условий. Однако расчетные результаты такой эффект выявили не во всех режимах. Ближе всего к экспериментальным расчетные результаты, полученные с использованием всех кодов для третьего режима, где энерговыделение подзон равномерно (см. рис. 2, а).

Наилучшее согласие с экспериментом по поперечному сечению модельной сборки имеют расчетные данные, полученные с помощью поканального кода BRS-TVS.R [5]. На периферии есть небольшие расхождения (ряды 1 и 6). В этом случае, по-видимому, менее точными являются используемые коэффициенты межканального обмена между периферийными и центральными ячейками ТВС.



Р и с. 2. Распределение среднего по рядам имитаторов твэлов подогрева теплоносителя на выходе из модельной сборки (а) и изменение температуры по длине измерительного имитатора твэла (б): $\circ$ — эксперимент; $\times$, $+$, $\triangle$, $\star$, $\diamond$ — расчетные данные, полученные с помощью кода BRS-TVS.R, SPIRAL, FLUENT, STAR-CD, MATRA соответственно (t — температура теплоносителя, Δt — подогрев теплоносителя, z — расстояние от начала участка энерговыделения, L — длина участка энерговыделения)

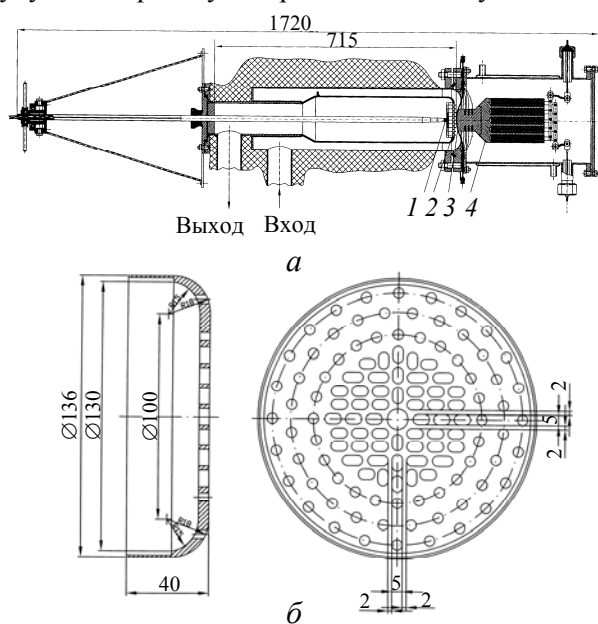
Почти во всех кодах температура части поверхности центрального имитатора, обращенной в более тесные ячейки ($s/d_1 = 1,25$), моделируется лучше, чем температура части периметра, направленной в открытые зоны модели ($s/d_2 = 1,34$). Лучшее согласие экспериментальных данных и расчетных с помощью всех кодов достигнуто на участках после дистанционирующей решетки. Наиболее близкое согласие с экспериментальными данными по температурным полям на поверхности измерительного имитатора твэла достигнуто при расчетах с помощью кода STAR-CD [8], хотя в районе решетки наблюдается некоторое расхождение с экспериментом (см. рис. 2, б).

Бенчмарк-эксперименты на модели мишени ускорительно-управляемой системы. Задание на проведение эксперимента было подготовлено с использованием данных, полученных в модели мишени ускорительно-управляемой системы в ФЭИ [11]. В бенчмарк-эксперименте участвовали три группы специалистов: из Японии [12], Испании [13] и Китая [14]. Позднее расчеты выполнили специалисты из

Италии [15], их результаты также учтены в настоящей работе.

Модель представляет собой осесимметричную конструкцию, установленную на жидкометаллическом стенде AP-1 (рис. 3). Теплоноситель подается снизу вверх в горизонтальный внешний кольцевой канал. Поворачиваясь, он ударяется о поверхность мембраны, уходит через профилированную входную решетку во внутренний канал (трубу), затем возвращается через расположенный в нижней части патрубков на вход циркуляционного насоса.

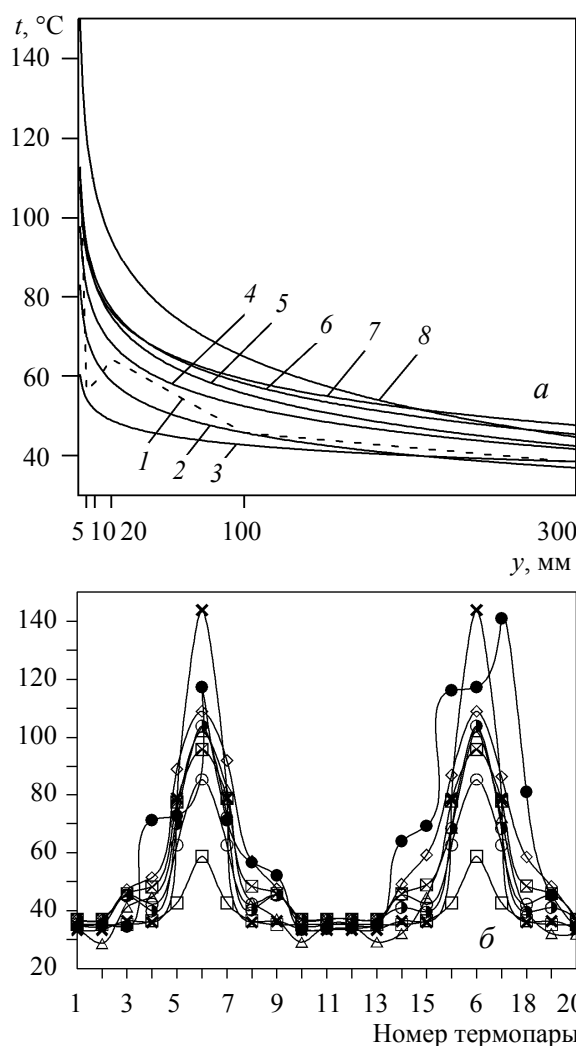
Мембрана представляет собой фигурную тонкостенную пластину из коррозионно-стойкой стали толщиной 1,5 мм. Тепловой поток на поверхности мембраны создается с помощью медного стержня диаметром 65 мм, торец которого припаян серебром к ее поверхности. Стержень нагревается методом теплового клина. Нагревательный блок представляет собой медную болванку диаметром 130, длиной 200 мм с 19 просверленными отверстиями диаметром 19, глубиной 165 мм. В отверстия блока вставляют керамические втулки диаметром 19 мм из оксида магния с четырьмя отверстиями под спирали диаметром 4 мм. Спирали изготовлены из нихромовой проволоки диаметром 1,2 мм и включаются по схеме последовательного или параллельного соединения. Нагревательный блок размещен в камере, заполненной гелием, который улучшает работу нагревателей ввиду высокой



Р и с. 3. Продольное сечение тепловой модели мишени (а) и профилирующая решетка (б): 1 — термпарный зонд; 2 — решетка с профилирующими отверстиями; 3 — мембрана мишени; 4 — медный блок с нихромовыми нагревателями

теплопроводности и предотвращает окисление медного блока при повышенной температуре. Исследования проводятся на эвтектическом натрий-калиевом сплаве в качестве теплоносителя, число Прандтля которого близко к числу Прандтля свинцово-висмутового эвтектического сплава.

Расчеты показывают монотонное уменьшение температуры теплоносителя на оси канала, в то время как экспериментальное распределение имеет минимум в центральном отверстии распределительной решетки (рис. 4, а) [16]. Наблюдается существенное различие между расчетной с помощью кодов и экспериментальной температурой теплоносителя (рис. 4, а, б). Основной причиной этого, по-видимому, является отсут-



Р и с. 4. Распределение температуры теплоносителя по оси модели мишени (а) и вдоль поверхности мембраны на расстоянии до мембраны 1 мм (б): 1, ● — эксперимент; 2, ○, 3, □, 4, ▣, 5, ◇, 6, △, 7, ●, 8, × — расчетные данные, полученные с помощью кода Phoenix 3.2, STAR-CD, AQUA ASM, AQUA TM, FLUENT RNG, FLUENT RSM, ANSYS, version 5.7.1 соответственно (y — расстояние от профилирующей решетки на входе во внутренний канал мишени)

вие возможности генерировать используемыми в кодах моделями турбулизацию потока (крупномасштабную турбулентность) за профилирующей решеткой вследствие взаимодействия струй.

Экспериментальные данные указывают на немонотонное изменение с увеличением температуры поверхности мембраны в направлении к ее периферии (рис. 5). Большинство расчетов указывает на монотонное уменьшение температуры в этом направлении. Противоположный характер поведения температуры отмечается в расчетах испанских специалистов с помощью кода STAR-CD. Такое поведение температуры мембраны может быть объяснено особенностью моделирования геометрии канала и энерговыделения. Расчетная температура на оси мембраны за исключением результатов, полученных с помощью кода ANSYS, меньше экспериментальной. Более высокая температура в центре мембраны, рассчитанная с помощью кода ANSYS, по сравнению с экспериментальной может быть объяснена принятым при расчете граничным условием, предполагающим постоянство теплового потока на омываемой теплоносителем поверхности мембраны.

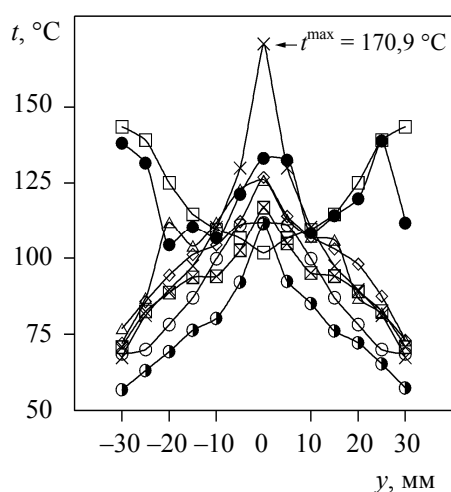
Значительное различие расчетной и экспериментальной температуры на периферии мембраны можно объяснить прежде всего нерегулярностью теплового потока в реальных условиях. Высокая теплопроводность материала тепловыделяющего блока в сравнении с мембраной может быть одной из причин такой нере-

гулярности теплового потока. Для более реалистичного моделирования теплопередачи в модели мишени часть греющего блока должна быть включена в расчетную область.

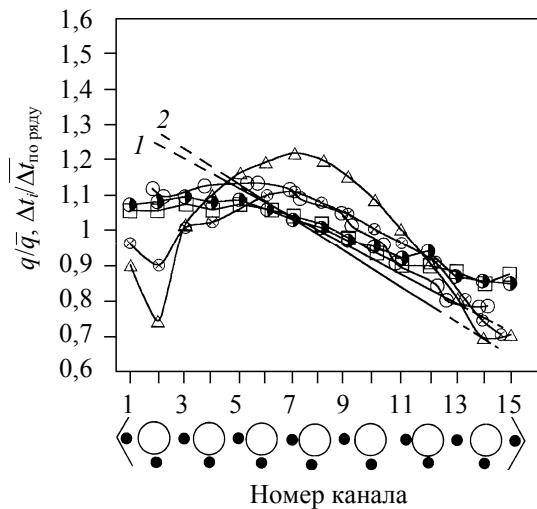
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ В МОДЕЛЬНЫХ ТВС С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Формирование полей скорости и температуры в ТВС определяется многими факторами, основными из которых являются геометрия сборки и тракта реактора, уровень и распределение энерговыделения и расхода, комплекс теплофизических свойств теплоносителя и материалов (удельная теплоемкость, теплопроводность и др.), флюэнс, перераспределение энерговыделения, расхода и др., случайные отклонения параметров.

Были получены многочисленные экспериментальные данные в модельных ТВС [17—21], геометрические параметры которых представлены в таблице: распределение скорости и подогрева жидкометаллических теплоносителей по радиусу модельных ТВС, распределение скорости по периметру периферийных гладких имитаторов твэлов, продольной и поперечной скорости по их периметру с дистанционирующей проволоочной навивкой, полученное с использованием электромагнитного метода измерений, распределение температуры по периметру оболочки периферийных имитаторов твэлов, распределение температуры теплоносителя в поперечном сечении модельной ТВС с неравномерным энерговыделением по сечению модельной ТВС и различными типами проволоочного дистанционирования твэлов (рис. 6), распределение температуры по длине и азимуту центрального имитатора твэлов при изгибе шести окружающих его имитаторов твэлов с касанием оболочками центрального имитатора в сечении по центру участка энерговыделения (рис. 7), температурное поле модельной ТВС при деформации чехла ТВС, максимальная азимутальная неравномерность температуры различных твэлов при их одиночном или групповом смещении в зависимости от числа Пекле, температурный



Р и с. 5. Экспериментальное (●) и расчетное с помощью кодов FLUENT RNG (△), STAR-CD (□), AQUA-TM (◇), AQUA-ASM (⬡), FLUENT RSM (●), Phoenix 3.2 (○), ANSYS, version 5.7.1 (×) распределение температуры на поверхности мембраны (y — расстояние от оси мембраны)

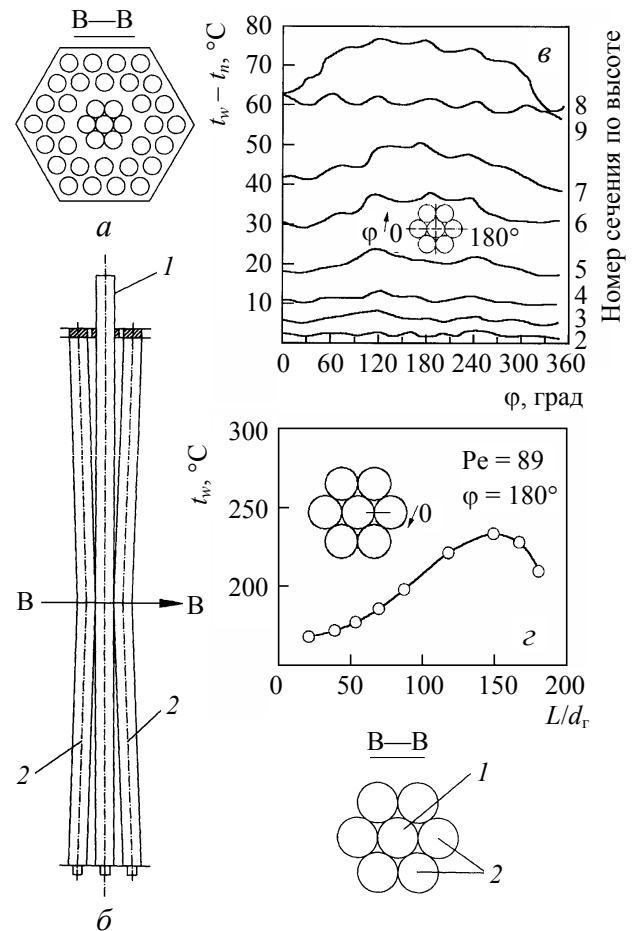


Р и с. 6. Распределение относительного энерговыделения твэлов и подогрева теплоносителя в поперечном сечении модельной сборки твэлов для различных вариантов дистанционирования твэлов: 1, 2 — градиент энерговыделения поперек грани чехла и диагонали ТВС соответственно; $\triangle$, $\otimes$ — однонаправленные навивки; $\square$ — разнонаправленные навивки по рядам твэлов по направлению диагонали ТВС; $\bullet$, $\circ$ — разнонаправленные навивки на твэлах с каждым третьим гладким твэлом

режим периферийных имитаторов твэлов при теплообмене через чехол модельной ТВС с теплоносителем, протекающим в зазорах между ТВС (неадиабатические граничные условия на чехлах ТВС) (рис. 8).

ВЕРИФИКАЦИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОДОВ

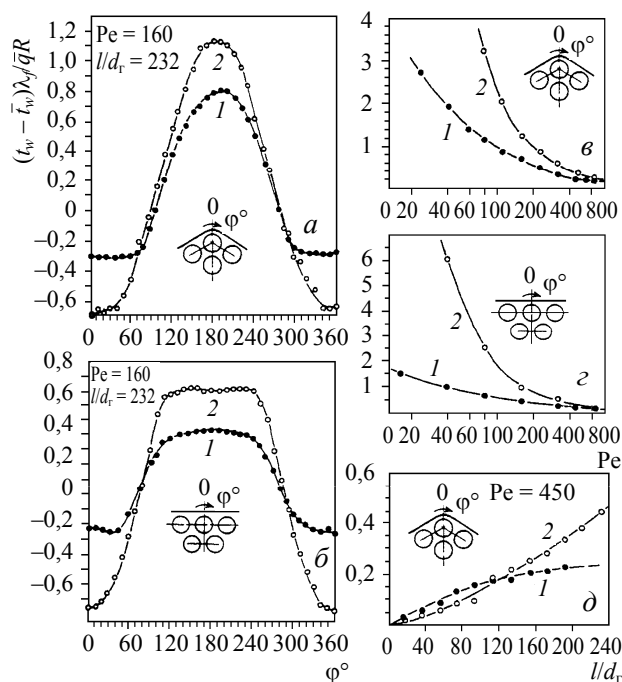
Результаты расчетов с помощью кода МИФ [22] для условий стандартной задачи по теплогидравлике модельной ТВС с неравномерным энерговыделением в поперечном сечении удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [23]. Вместе с тем сопоставление этих же экспериментальных данных с результатами расчетов с помощью кодов COTEC [25], SUPERENERGY [26] и COBRAIV [27] указывает на их существенное различие (рис. 9). Причиной этого могут быть различия прежде всего в формулировке используемых теплогидравлических моделей, системах замыкающих соотношений, точности моделирования геометрии ТВС, задании граничных условий и др. Безусловно, важное значение имеет использование точной системы замыкающих теплогидравлических соотношений. Так, система замыкающих соотношений для поканальной модели теплогидравли-



Р и с. 7. Поперечное (а), продольное сечение (б) модельной ТВС быстрого реактора с прогибом имитаторов твэлов в центральной зоне, поле температуры по периметру (в) и длине центрального имитатора твэла модели (г): 1 — центральный поворотный имитатор твэла; 2 — деформированные имитаторы твэлов (t_w — температура поверхности твэла, t_n — температура на вход в модельную ТВС, L — расстояние от начала участка электрообогрева, d_r — гидравлический диаметр канала)

ческого расчета ТВС активной зоны быстрого реактора включает коэффициенты межканального обмена массой, импульсом и энергией вследствие различных механизмов обмена — конвективного, молекулярно-турбулентного, за счет теплопроводности твэлов во внутренней и периферийной областях ТВС, коэффициенты гидравлического сопротивления при продольном и поперечном обтекании внутренних и периферийных каналов, образованных гладкими и оребренными проволоочной навивкой твэлами, коэффициенты теплоотдачи, локальные азимутальные неравномерности температуры твэлов и др.

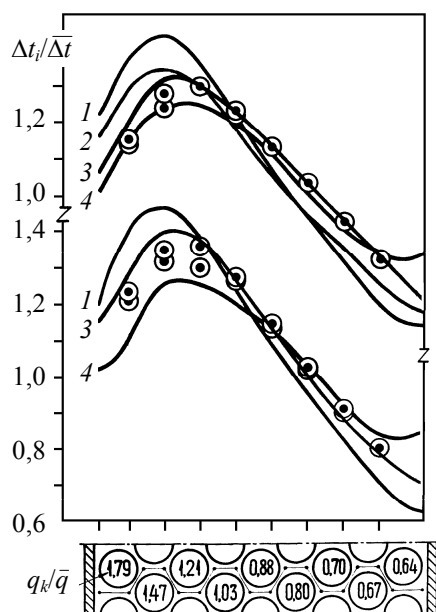
Замыкающие соотношения получены на основе многочисленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, анализа



Р и с. 8. Распределение безразмерной температуры по периметру углового (а), бокового твэла (б) при адиабатических (1) и неадиабатических условиях (2) на чехле ТВС и максимальной неравномерности температуры твэлов в зависимости от числа Пекле (в, г) и по длине участка энергоснабжения (д) (λ_f — теплопроводность теплоносителя, $\bar{q}$ — средний по периметру твэла тепловой поток, R — радиус твэла, φ — угловая координата, Pe — число Пекле, l — расстояние от начала участка энергоснабжения)

и обобщения полученных данных и являются функцией геометрических и режимных параметров. Экспериментальные данные для них получены в отдельных диапазонах изменения параметров. В работах ФЭИ на основе разработки расчетных моделей протекающих процессов они экстраполированы на существенно более широкий диапазон параметров [19, 28, 29]. Экспериментальные исследования, направленные на их уточнение, продолжаются и в настоящее время. Существующие в настоящее время зависимости для замыкающих соотношений требуют дополнительного анализа и уточнения.

Теплогидравлический анализ активной зоны быстрого реактора является составной частью более широкой термомеханической задачи — расчетного анализа формоизменения ТВС и их прочностных характеристик. Работы по разработке современных кодов термомеханического расчета активной зоны продолжаются в ФЭИ с второй половины 1990-х гг., создан термомеханический код МИФ-СКД, с его использованием проведен термомеханический анализ ТВС активной зоны БН-600 [30].



Р и с. 9. Экспериментальное исследование относительного распределения подогрева теплоносителя в поперечном сечении модельной ТВС ($s/d = 1,08$, $d = 13$ мм, $h = 100$ мм, $L = 1170$ мм) с неравномерным энергоснабжением по сечению ТВС: $\odot$ — эксперимент [15]; 1, 2, 3, 4 — расчет с помощью кодов COTEC [16], SUPERENERGY [17], МИФ [16], COBRAIV [18] (Δt_i — подогрев в канале i , $\Delta \bar{t}$ — средний подогрев теплоносителя в ТВС, q_k — плотность теплового потока k -го твэла, температура поверхности твэла, $\bar{q}$ — средняя плотность теплового потока)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал о скорости и температуре модельных ТВС с учетом влияния различных факторов и теплогидравлических характеристиках ТВС. Эти данные получены для различных геометрических условий и режимных параметров, имеют различную точность. Для верификации и сопоставления теплогидравлических кодов для расчета ТВС активной зоны быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем необходима разработка системы верификационных тестов и условий для проведения бенчмарк-экспериментов. Для использования экспериментальных данных, разработки верификационных тестов для теплогидравлических кодов, заданий на выполнение стандартных задач по теплогидравлике активной зоны быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, получения уточненных формул для расчетов теплогидравлических характеристик ТВС необходимы систематизация данных, их анализ, оценка и в конечном итоге создание базы экспериментальных данных по теплогидрав-

Геометрические параметры модельных ТВС активной зоны и зоны воспроизводства быстрых реакторов

Характеристика	Модель активной зоны										Модель экранов БОР-60, БН-350, -600				Модель					
	БН-350						БОР-60								БН-600		x = 1,113		x = 1,214	
Диаметр элементов, мм: внешний внутренний	17±0,02 13±0,05						17,4±0,02 13±0,05				14±0,02 11		17,6 16,4	24,7 20	24,7 20	24,7 20	15,8 13			
Относительный шаг решетки $x = s/d_2$	1,24		1,15				1,1				1,15		1,04	1,062	1,113	1,214	1,32			
Длина обогрева, мм	730		690±2,5				900±2,5				1620		700±2,5	1200±3	1200±3	1200±3	1200±3			
Расстояние между торцевыми решетками, мм	790		750				950				1720		770	1300	1300	1300	1300			
Расстояние от торца трубок до начала обогрева, мм	45		40				30				51		35	50	50	50	50			
Форма ребра	Гладкие элементы		3-Заходные сечением 1,8×1,2 мм		Проволока диаметром 2,5 мм на всех эле- ментах		Проволока диаметром 2,5 мм на центральных элементах и диаметром 1,2 мм на периферийных элементах		Гладкие элементы		Эллипсная (2,5×1,5), круглая проволока диа- метром 1,5 мм на остальных эле- ментах, на пово- ротных централь- ных элементах диаметром 1,2 мм		Гладкие элементы		Прямо- угольные сечением 0,8×0,8 мм		Гладкие элементы			
Шаг навивки, мм			750		280		280		317		1500									
Относительный зазор между стенкой и твэлами, $\Delta/(s - d_2)$	0,5	0	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,39	0,26	0,43	0,52	0,5						
Зазор между стенкой и твэлами, мм	2	0	1,28	1,28	2,55	2,55	1,74	1,05	0,7	0,6	0,72	2,29	2,6	2						
Диаметр вытеснителей, мм	Без вытеснителей						Без вытес- ните- лей	4,5	Без вы- тесните- лей	4,5	Без вытес- ните- лей	4	Без вытес- ните- лей	4,5	Без вытес- ните- лей	4	6,5	4	5	6
Толщина стенки обечайки, мм	1,5						2		1,5		5		5		5		5			
Внутренний диаметр обечайки под ключ, мм	130,6	119	121	121	124	121	119				72,5		82,5	116,8	121,4	133,2	93			
Нагреватель	Нихромовая проволока диаметром 1,5 мм										Нихромовая лента 8×0,4 мм		Нихромовая проволока диаметром 1,5 мм	Нихромовая лента размером 8×0,4 мм						
Толщина электроизоляционно- го слоя трубки, мм	0,5						0,5				0,5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5			
Число элементов	37						37				19		19	19	19	19	19			
Проходное сечение модели, 10 ⁻³ мм ²	6,52	3,78	4,3	4,06	4,66	4,19	3,71	3,45	3,67	3,38	1,62	1,47	1,28	Без вытес- ните- лей	4,0	6,5	3,5	6,02	3,43	3,77

лике активной зоны с жидкометаллическим теплоносителем.

Для формирования полной системы верификационных тестов по теплогидравлике активной зоны быстрого реактора с натриевым теплоносителем необходимо дополнительно провести прецизионный эксперимент. Для получения необходимого объема знаний в обоснование теплогидравлических характеристик активной зоны с охлаждением тяжелыми теплоносителями должна быть продолжена программа соответствующих экспериментальных теплогидравлических исследований. Необходимы дополнительный анализ замыкающих соотношений для уравнений гидродинамики и теплообмена в ТВС активной зоны в рамках различных моделей для теплогидравлического расчета ТВС, формирование программы исследований и уточнение на этой основе существующих зависимостей для замыкающих соотношений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В.И., Васильев Б.А. Задачи сооружения БН-800 и возможности создания перспективных быстрых реакторов. — Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 1, с. 21—26.
2. Асмолов В.Г., Зродников А.В., Солонин М.И. Инновационное развитие ядерной энергетики России. — Там же, т. 103, вып. 3, с. 148—155.
3. Казачковский О.Д., Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Температурные поля в формоизмененных ТВС быстрых реакторов. — Там же, 1988, т. 65, вып. 2, с. 89—97.
4. Zhukov A.V., Kuzina J.A., Sorokin A.P. e.a. Specification of the benchmark problem «Hydrodynamics and heat transfer in the model pin bundles with liquid metal coolant». — In: Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Components Cooled by Liquid Coolant in Single/Two-Phase. Working Material. TWG-FR/125. Vienna: IAEA, 2005, p. 138—172.
5. Afremov D.A., Smirnov V.P., Yashnikov D.A. Calculations using BRS-TVS.R code as a part of the standard problem «Hydraulics and heat exchange in model rod assemblies with liquid-metal cooling including uncertainty analysis». — Ibid., p. 173—196.
6. Ohshima H., Imai Y. Thermal hydraulic analysis of model pin bundle with liquid metal coolant — simulation results of standard problem. — Ibid., p. 197—211.
7. Peña A., Esteban G.A. Benchmark problem: hydraulics and heat transfer in the model pin bundles with liquid metal coolant. UPV-EHU calculations. — Ibid., p. 247—259.
8. Carlsson J., Wider H. Results of calculations of the standard problem «Hydrodynamics and heat transfer in a sub-assembly model cooled by liquid metal coolant». — Ibid., p. 212—226.
9. Son H., Suh K. Result of calculations of the standard problem hydraulics and heat transfer in a subassembly model cooled by liquid metal coolant. — Ibid., p. 227—247.
10. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Анализ бенчмарк-эксперимента по гидравлике и теплообмену в сборке имитаторов твэлов с жидкометаллическим охлаждением. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 5, с. 336—348.
11. Orlov Yu., Sorokin A., Bogoslovskaja G. e.a. Specification of the benchmark problem thermal experiments in the ADS target model: — In: Proc. of the 10th Intern. Meeting of the IAHN Working Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics on Thermal Hydraulics for Fast Reactors with Different Coolants. Obninsk, 2003, p. 207—235.
12. Takata T., Yamaguchi A., Hachimoto A. Benchmark calculation of the thermal experiments in the ADS target model. — Ibid., p. 251—269.
13. Pena A., Castro A., Esteban G.A. e.a. Benchmark activities of UPV/EHU and LAESA concerning the TS-1 target system experiments. — Ibid., p. 236—250.
14. Chen H. Calculation results of the benchmark problem. — Ibid., p. 270.
15. Mikhlin V.I., Marcxelo V. Results of Testing the ANSYS (part FLOTTRAN) Code in the ADS-Target-Model Thermo-Hydraulics Calculations. ENEA, Italy (Bologna), December 2001.
16. Сорокин А.П., Богословская Г.П., Михин В.И. и др. Сравнительный анализ результатов бенчмарк-эксперимента по теплогидравлике модели мишени ускорительно-управляемой системы. — Атомная энергия, 2003, т. 95, вып. 5, с. 346—353.
17. Жидкие металлы. Сборник статей под ред. П.Л. Кириллова, В.И. Субботина, П.А. Ушакова. М.: Атомиздат, 1967.
18. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.
19. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. М.: Энергоатомиздат, 1985.
20. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л. и др. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. Под ред. А.В. Жукова, А.П. Сорокина. Обнинск, ФЭИ, 1988.
21. LMFR Core Thermohydraulics: Status and Prospects. TECDOC-1157. Vienna: IAEA, 2000.
22. Казачковский О.Д., Сорокин А.П., Жуков А.В. и др. Метод сосредоточенных параметров в задаче о температурном поле в формоизмененных ТВС быстрых реакторов с неадиабатическими граничными условиями: Препринт ФЭИ-1972, 1985.
23. Сорокин А.П., Богословская Г.П. Методы теплогидравлических расчетов тепловыделяющих сборок активной зоны быстрых реакторов. — Теплоэнергетика, 1997, № 3, с. 21—26.

24. **Markley R., Engel F.** LMFBFR blanket assembly heat transfer and hydraulic test data evaluation. — In: Meeting of Thermodynamics of FBR Fuel Subassemblies under Nominal and Non-Nominal Operating Conditions. IAEA, Karlsruhe, 1978, IWGFR/29, p. 229—253.
25. **Novendstern E.** Mixing model for wide fuel assembly. — Transact. Am. Nucl. Soc., 1972, v. 15, № 12, p. 866—867.
26. **Chen B., Todreas N.** Prediction of the coolant temperature field in a breeder reactor including interassembly heat transfer. — Nucl. Engng Design, 1975, v. 35, № 3, p. 423—440.
27. **Stewart C., Rowe D.** Advanced continuous fluid eulerian computation scheme for flows with large density gradients. — Transact. Am. Nucl. Soc., 1976, v. 24, № 1, p. 178.
28. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межка-нальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энерго-атомиздат, 1989.
29. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межка-нальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. М.: Энерго-атомиздат, 1991.
30. **Кравченко И.Н., Багдасаров Ю.Е., Забудько Л.М., Лихачев Ю.И.** Расчет на прочность твэлов и шести-гранного чехла ТВС с учетом совместного деформиро-вания пучка твэлов и чехла в процессе облучения в ак-тивной зоне быстрого реактора: Препринт ФЭИ-1840, 1987.

Поступила в Редакцию 23.03.09

УДК 539.4

ПРОЦЕССЫ МАЛОЦИКЛОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ АЭС И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

Махутов Н.А., Гаденин М.М. (ИМАШ РАН, г. Москва),

Чернявский О.Ф., Чернявский А.О. (ЧПИ, г. Челябинск), Европин С.В. (ИЦП МАЭ, г. Москва)

Современные компьютерные методы и па-кеты программ создали принципиальную вычис-лительную возможность расчетного анализа ки-нетики деформирования и разрушения в течение всей жизни конструкции с учетом почти любых геометрических форм, программ нагружения, физической и геометрической нелинейности. Рост возможностей сопровождался повышением требований к традиционным задачам понимания механизмов протекающих процессов для рацио-нального управления ими, к оценкам прочности добавились оценки безопасности, предъявляю-щие высокие специфические требования к ин-формативности и точности расчетов [1, 2]. Дос-товерность и точность результатов, а также тру-доемкость расчетов стали зависеть в первую очередь от полноты и точности исходных дан-ных, выбора модели материала и методов про-гнозирования разрушения, а не от упрощений расчетной геометрической схемы, как было раньше.

Исходные данные об условиях нагружения и начальном после изготовления состоянии конструкции всегда являются неполными и не-точными, требования к ним зависят не только от цели расчета, но и от ожидаемых характеристик процесса, неизвестных до выполнения расчета. Многочисленные модели материалов, представ-ленные в известных пакетах метода конечных элементов, почти все являются феноменологи-

ческими, т.е. описывают определенные явления в ограниченном диапазоне условий. Универ-сальные модели, описывающие достаточно раз-нообразные эффекты, не могут быть построены иначе, как на основе физических представлений о микромеханизмах деформирования и разру-шения. Такие модели развиты пока недостаточ-но, их создание и применение сталкиваются с серьезными объективными трудностями. Выбор той или иной модели материала не алгоритми-зирован, поскольку зависит от типа деформиро-вания, не всегда известного до расчета.

В сравнительно простых случаях разруше-ния при однократном монотонном нагружении или многоциклового усталости эти проблемы обычно удается решить на основе интуитивных представлений. При малоцикловом термомеха-ническом нагружении интуитивный выбор мо-дели материала и соответствующих исходных данных, основных факторов, влияющих на по-ведение конструкции, а также локализацию опасных зон по объему и времени может приво-дить к качественно неверным результатам. Их ошибочность не обнаруживается в ходе расчета кинетики деформирования без специальных ис-следований. В таких ситуациях целесообразно разделить расчет на два этапа: вначале прибли-женно определить условия реализации качест-венно различных механизмов деформирования на основе упрощенных моделей материала, за-