М Е Х А Н И К А

УДК 532.5

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТЕНДЕ «ПОДДОН»

© 2009 г.

С.Л. Осипов [1], ***С.А. Рогожкин*** [1], ***В.А. Соболев*** [1], ***С.Ф. Шепелев*** [1], ***А.А. Кожаев*** [2], ***М.С. Маврин*** [2], ***А.А. Рябов*** [2]

[1] Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
[2] Саровский инженерный центр, Технопарк «Система-Саров», Нижегородская обл.

birbraer@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 15.05.2009

Описана схема работы стенда «Поддон», предназначенного для моделирования специального сдерживающего устройства реактора БН-800 при запроектной аварии с расплавлением активной зоны. На стенде проведены эксперименты с использованием воды в качестве теплоносителя. В комплексе программ STAR-CD проведено численное решение термогазодинамических процессов, происходящих при эксперименте. Приведены результаты сравнения физического эксперимента и численного моделирования.

Ключевые слова: реактор, теплообменник, система охлаждения, естественная конвекция, численное моделирование, газодинамика, STAR-CD, STAR-CCM+.

Введение

Для обоснования конструкции, подтверждения проектных характеристик специального удерживающего устройства (поддон), предназначенного для защиты днища корпуса реактора БН-800 при тяжелой запроектной аварии с расплавлением активной зоны, выполняется комплекс расчетных и экспериментальных работ. В ОКБМ разработан и изготовлен стенд «Поддон» с использованием воды в качестве теплоносителя, проведены экспериментальные исследования циркуляционных конвективных течений. Для верификации кодов, которые будут применяться при расчетах поддона реактора БН-800, проведено численное моделирование теплогидравлических процессов в стенде «Поддон».

1. Устройство для сбора расплавленного топлива реактора БН-800

В проекте реактора БН-800 плавление активной зоны постулируется. Предполагается, что фрагменты разрушенной активной зоны перемещаются вниз с проплавлением нижнего воспроизводящего экрана, коллекторов, напорной камеры и выходят в нижнюю натриевую полость перед днищем корпуса.

С целью не допустить проплавления основного и страховочного корпусов реактора, под напорной камерой расположено улавливающее устройство [1], предназначенное для удержания на нем расплавленной активной зоны (кориума).

Устройство для сбора топлива представляет собой поддон, состоящий из днища, конусной обечайки, приваренной к периферии днища, опорной конструкции и семи вертикальных проходок (тяговых труб). Внутренняя поверхность поддона облицована тугоплавким молибденовым сплавом.

Устройство для сбора и локализации расплавленного топлива реактора БН-800 представлено на рис. 1.

При анализе протекания аварии рассматриваются два предельных варианта естественной циркуляции теплоносителя при нахождении кориума на поддоне:

– разрушение напорной камеры не препятствует развитию естественной циркуляции теплоносителя через разрушенную активную зону (рис. 2, вариант 5 по табл. 2);

– разрушение напорной камеры приводит к полному перекрытию проходных сечений в нижней плите напорной камеры сталью расплавившихся ТВС (рис. 3, вариант 4 по табл. 2).

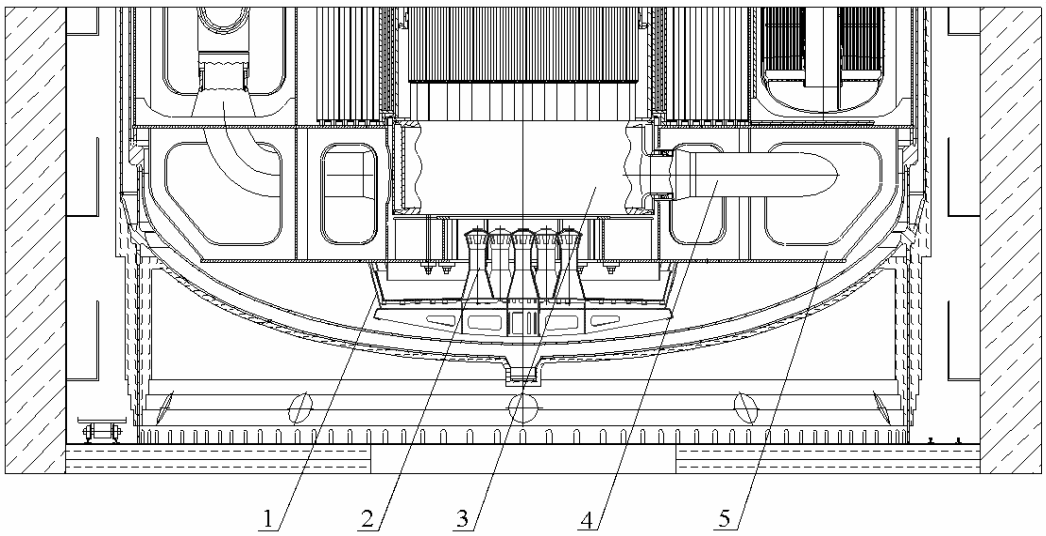

Рис. 1. Устройство для сбора расплавленного топлива реактора БН-800: 1 – поддон; 2 – тяговые трубы; 3 – напорная камера; 4 – напорный трубопровод; 5 – опорный пояс

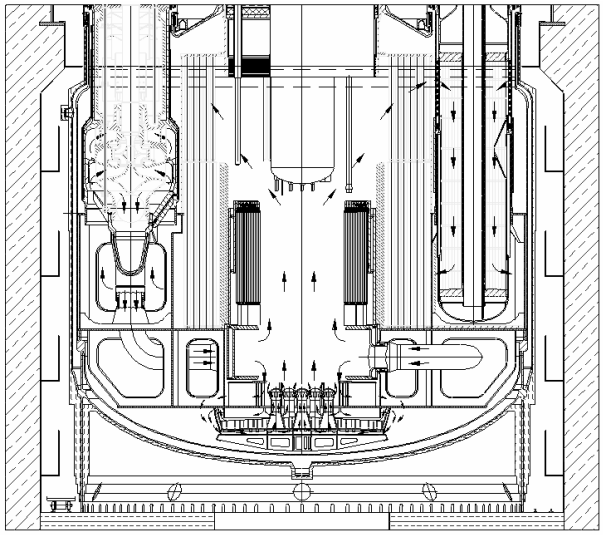

Рис. 2. Схема циркуляции теплоносителя при сквозном прожоге напорной камеры

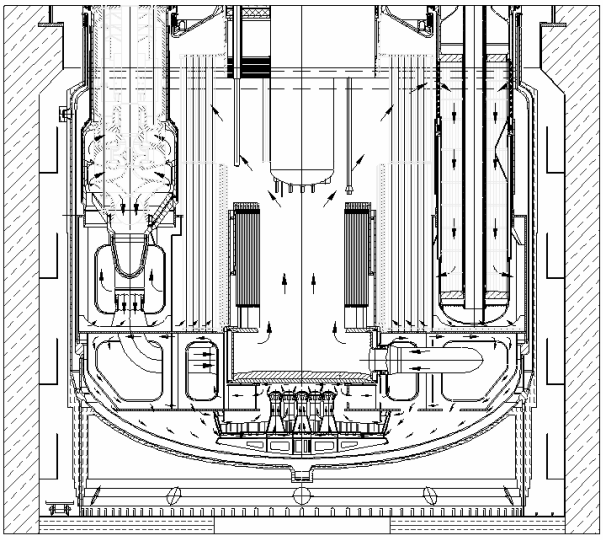

Рис. 3. Схема циркуляции теплоносителя при перекрытии нижней плиты напорной камеры сталью расплавленных ТВС

2. Стенд «Поддон»

Стенд предназначен для моделирования теплогидравлических процессов в нижней части корпуса реактора в области поддона. Его конструкция выполнена с геометрическим подобием в масштабе 1:10. Тепловыделения в расплаве топлива активной зоны на поддоне имитируются двумя пластинчатыми спиральными электронагревателями суммарной мощностью 50 кВт. Шесть промежуточных теплообменников (ПТО) заменены одним кольцевым теплообменником «дистиллят – сетевая вода». Постулируемое в результате запроектной аварии полное или частичное проплавление плит напорной камеры моделируется степенью перфорированности верхней и нижней плит модели напорной камеры. Конструктивная схема и общий вид стенда «Поддон» представлены на рис. 4.

Основные технические характеристики стенда приведены в таблице 1.

Стенд снабжен средствами контроля и измерения параметров (на стенде установлены 233 термопары и расходомерное устройство), входящими в состав информационно-измерительной системы, а также предусмотрены иллюминаторы для визуального наблюдения за развитием естественной циркуляции.

3. Экспериментальные исследования на стенде «Поддон»

Целью экспериментальных исследований на стенде является получение информации о контурах циркуляции, возникающих в модели, и об их устойчивости, о распределении температур воды в контурах, величине мощности, выделяемой в поддоне, которая может отводиться через ПТО.

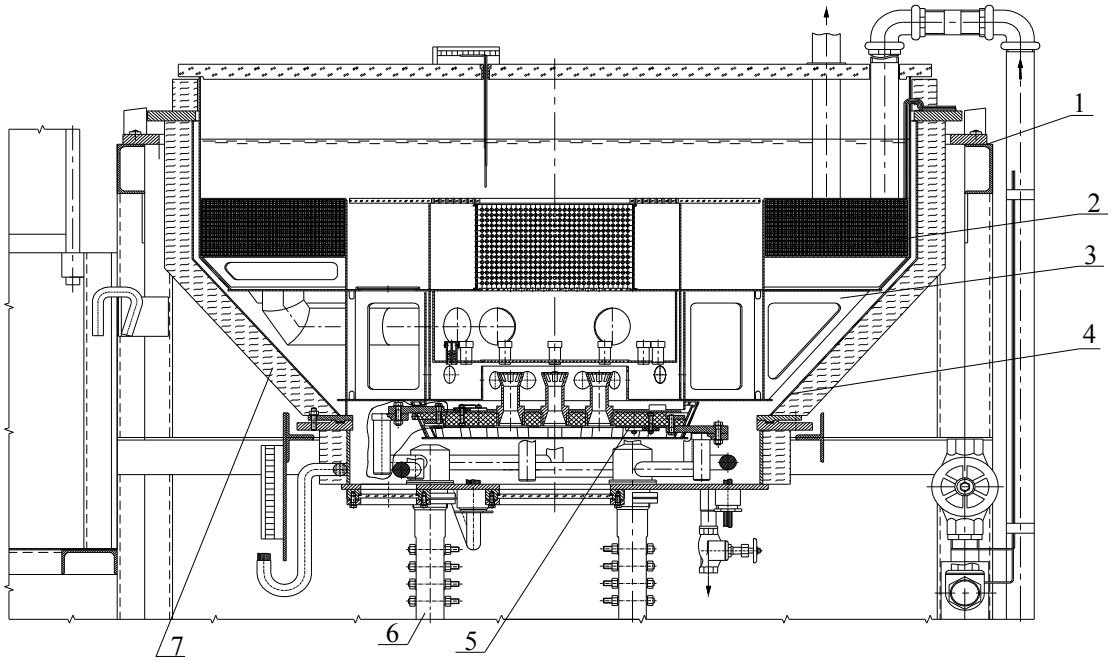

Рис. 4. Конструкция модели стенда «Поддон»: 1 – постамент; 2 – теплообменник; 3 – опорный пояс; 4 – корпус; 5 – поддон с нагревателями; 6 – токопровод; 7 – теплоизоляция

Таблица 1

Технические характеристики стенда «Поддон»

Наименование параметра	Значение
Геометрический масштаб моделирования	1:10
Потребляемая электрическая мощность (на два электронагревателя) – не более, кВт	50
Потребляемый расход сетевой воды через теплообменник – не более, кг/с	5.56
Температура потребляемой сетевой воды: – холодной – не более, ^{o}C – горячей – не менее, ^{o}C	 20 40
Температура воды в полостях опорного пояса – не более, ^{o}C	90
Объём дистиллированной воды в модели – не более, м^3	0.6
Габариты модели: – диаметр, мм – высота, мм	 1500 до 1000

Исследования на стенде «Поддон» проводились при различной степени перфорации решеток на верхней и нижней плитах напорной камеры для пяти вариантов (представленных в табл. 2) [2].

Таблица 2

Характеристики вариантов исследований

Вариант исследований	Степень перфорированности верхней и нижней плит, %	
	верхней плиты	нижней плиты
1	100	50
2	10	50
3	100	0
4	10	0
5	100	100

4. Численное моделирование

Рассматривается задача свободной конвекции теплоносителя с теплообменом между жидкостью и твердыми телами в условиях адиабатических границ на внешней поверхности стенда. Перфорация конструктивных элементов и кольцевой теплообменник моделируются на основе пористых сред с эквивалентными термогидравлическими параметрами. Теплосъем по объему теплообменника постоянный.

Циркуляционные конвективные течения теплоносителя в стенде описываются на основе фундаментальных законов сохранения, сформулированных в известных уравнениях Навье – Стокса [3], которые для произвольного объема V с поверхностью **a** можно записать в форме:

$$\frac{d}{dt}\int_V \mathbf{W}dV + \oint[\mathbf{F}-\mathbf{G}]d\mathbf{a} = \int_V \mathbf{H}dV,$$

где

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho\mathbf{v} \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho(\mathbf{v}-\mathbf{v}_g) \\ \rho(\mathbf{v}-\mathbf{v}_g)\otimes\mathbf{v} + p\mathbf{I} \\ \rho(\mathbf{v}-\mathbf{v}_g)H + p\mathbf{v}_g \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{T} \\ \mathbf{T}\cdot\mathbf{u} + \mathbf{q}'' \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{f}_r + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_p + \mathbf{f}_u \\ 0 \end{bmatrix},$$

где ρ, $\mathbf{v}$, E и p – плотность, скорость, полная энергия единицы массы и давление жидкости соответственно, $\mathbf{T}$ – вектор вязких напряжений, $\mathbf{I}$ – интенсивность турбулентности, $\mathbf{q}''$ – вектор потока тепла, $\mathbf{f}_r$, $\mathbf{f}_g$, $\mathbf{f}_p$ и $\mathbf{f}_u$ – компоненты внешних сил, действующих на жидкость, $\mathbf{v}_g$ – скорость движения сетки, $\mathbf{x} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ – вектор координат.

Полная энергия связана с энтальпией следующим образом:

$$E = H - p/\rho,$$

где

$$H = C_p T + |\mathbf{v}|^2/2,$$

H – суммарный вектор сил, действующих извне. При решении задач с естественной конвекцией гравитационный член определяется как

$$\mathbf{f}_g = (\rho - \rho_{ref})\mathbf{g},$$

где $\mathbf{g}$ – вектор ускорения свободного падения, а ρ_{ref} – контрольная плотность.

При этом полное давление в жидкости:

$$p_{piezo} = p + \rho_{ref}\mathbf{g}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0),$$

где $\mathbf{x}_0$ – координата, для которой задана контрольная плотность.

При моделировании вязких течений тензор напряжений **T** представляется в виде суммы:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_l + \mathbf{T}_t,$$

где

$$\mathbf{T}_l = \mu\left[\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v}^T - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\mathbf{v})\mathbf{I}\right]$$

– это ламинарный тензор напряжений, а $\mathbf{T}_t$ – тензор напряжений Рейнольдса.

Для численного решения нелинейной задачи применяются программные средства STAR-CD, STAR-CCM+ и STAR-Design, использующие способ пространственной дискретизации метода конечных объемов MARS.

5. Пространственная дискретизация

Трехмерная сеточная модель в расчетной области разрабатывается на основе автоматических построителей поверхностной и объемной сетки программы STAR-CCM+ и STAR-Design. При этом предварительно исходная геометрическая модель стенда, на основе которой создается поверхностная сетка, освобождается от ряда несущественных деталей, не оказывающих влияния на термодинамическое поведение системы. Качество пространственной сетки непосредственно влияет на точность численного моделирования структуры течения. Поэтому к сетке предъявляются специальные требования. Размеры расчетных ячеек выбираются, а впоследствии и корректируются для получения гладкого распределения расчетных полей температуры и скорости. Основная сетка по пространству строится на многогранных ячейках (polyhedral cells) с использованием призматических пристеночных слоев, при этом контролируются размеры и форма ячеек. Форма должна быть как

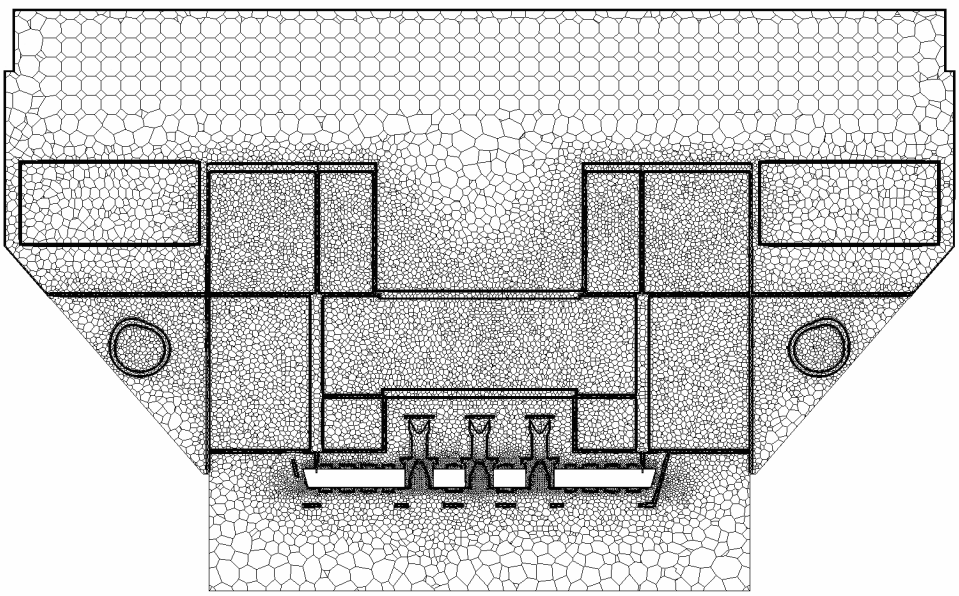

Рис. 5. Расчетная сетка для варианта 2 (плоскость симметрии)

можно ближе к правильному многограннику. Для описания теплопередачи между твердыми телами и жидкостями используется регулярная сетка. С учетом описанных требований разработаны группа локальных сеточных моделей характерной размерности ~$5\cdot10^6$ ячеек каждая и ряд общих моделей для решения полной задачи, каждая из которых включает ~$15\cdot10^6$ячеек.

6. Особенности численного моделирования элементов стенда

В верхней части стенда (рис. 4) размещен теплообменник, предназначенный для отвода тепловой энергии, выделяемой электронагревателями. Теплообменник представляет собой каскад концентрично расположенных кольцевых трубок относительно малого диаметра, по которым течет охлаждающая вода, отводящая тепло от циркулирующего между трубками дистиллята. Ввиду большого количества трубок в теплообменнике и отверстий в перфорированных деталях прямое моделирование этих элементов сопряжено со значительными вычислительными затратами. Поэтому для численного описания установившихся конвективных течений теплообменный трубный пучок и перфорация в компьютерной модели представляются пористыми средами с эквивалентными гидравлическими характеристиками.

Известно, что в канальных течениях градиент давления пропорционален скорости потока:

$$-K_x \cdot V_x = \frac{dp}{dx},$$

где K_x – сопротивление, V_x – скорость в направлении оси x. Сопротивление K_x связывается со скоростью потока в форме линейной комбинации параметров:

$$K_x = a_x|V| + b_x .$$

Для определения коэффициентов сопротивления a_x и b_x проводится прямой расчет фрагмента конструкции теплообменника и перфорации с детальным описанием элементов – трубок, отверстий. Найденные из этих расчетов коэффициенты сопротивления и являются параметрами пористых сред, представляющих теплообменник и перфорации в общей компьютерной модели.

Для пористой среды теплообменного аппарата кроме гидравлической характеристики подбирается также энергетическая характеристика – удельный теплосъем. Отвод тепла в пористой среде осуществляется путем введения отрицательного распределенного источника мощности, величина которого в каждой точке теплообменника зависит от параметров протекающего через него теплоносителя. Для получения характеристик этого источника проводится серия прямых численных расчетов фрагментов трубного пучка при различных скоростях и температурах теплоносителей.

Такая методика описания пористой среды с распределенным теплосъемом прошла проверку на нескольких модельных задачах, продемонстрировав высокую точность расчетов суммарного съема тепла, с погрешностью не более 1%. Однако численные эксперименты с рассмат-

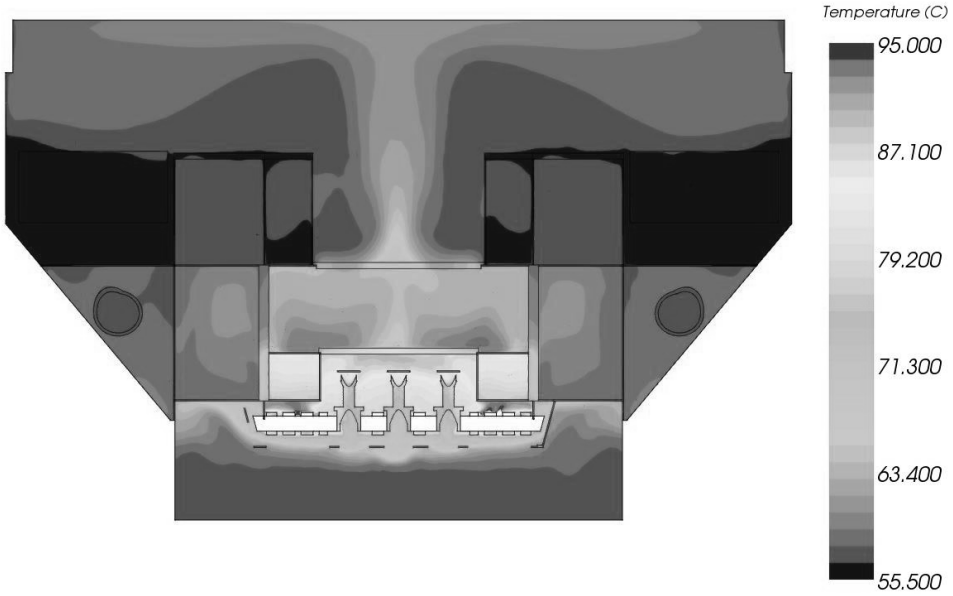

Рис. 6. Установившаяся температура для варианта 4 (плоскость симметрии)

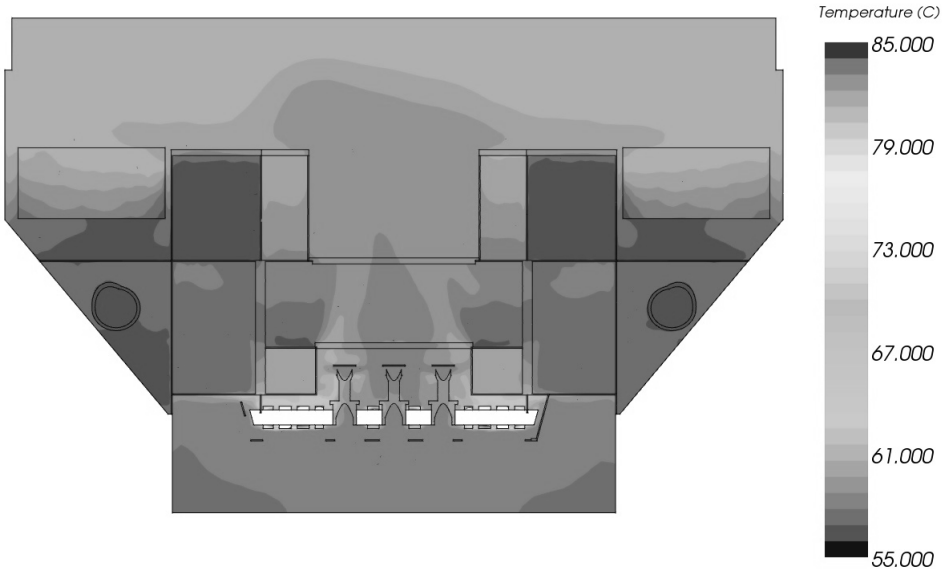

Рис. 7. Установившаяся температура для варианта 5 (плоскость симметрии)

риваемой задачей показали, что применение распределенного теплосъема в пористой среде порой требует сотен тысяч итераций для получения стационарного решения. В связи с этим для экономии вычислительных ресурсов было введено осреднение теплосъема по объему пористой теплообменной среды. Этот прием, безусловно, вносит некоторые погрешности в поле температур в окрестности теплообменника и не позволяет точно отражать распределение термодинамических параметров в теплообменнике. Однако он дает возможность получить приемлемое решение полной задачи при значительно меньших вычислительных затратах.

7. Численные результаты и их верификация

Численные расчеты выполнялись для трех вариантов различных комбинаций степеней перфорации верхней и нижней плит (варианты 2, 4, 5 по табл. 2) при следующих исходных данных: материал твердых тел – сталь, теплоноситель стенда – дистиллированная вода, суммарная мощность электронагревателей – 7 кВт. Плотность воды является функцией температуры.

При решении задач оценка сходимости проводится на основе следующих показателей: достижение нормализованными невязками уровня

10^{-3} (нормализация проводится на абсолютное значение величин), установление энергетического баланса между нагревателем и теплообменником, установление стационарных значений термодинамических величин в контрольных точках.

Верификация разработанных компьютерных моделей проводится путем сравнения численных и экспериментальных результатов по установившимся температурам в двадцати точках. Расположение точек и стационарное поле температур для варианта 2 показаны на рис. 8 и 9. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных температур для трех вариантов представлен в табл. 3. Анализ показывает, что для всех рассмотренных вариантов расчетные и экспериментальные температуры весьма близки. Среднеквадратичное отклонение равно 5%, а максимальное отличие не превышает 8% при нормировании на разницу между максимальной и минимальной температурами в стенде. Максимальная разница наблюдается в застойных зонах и объясняется тем, что время проведения эксперимента оказалось недостаточным, чтобы прогреть эти зоны (стационарный режим в этих зонах не достигался). В целом близость данных

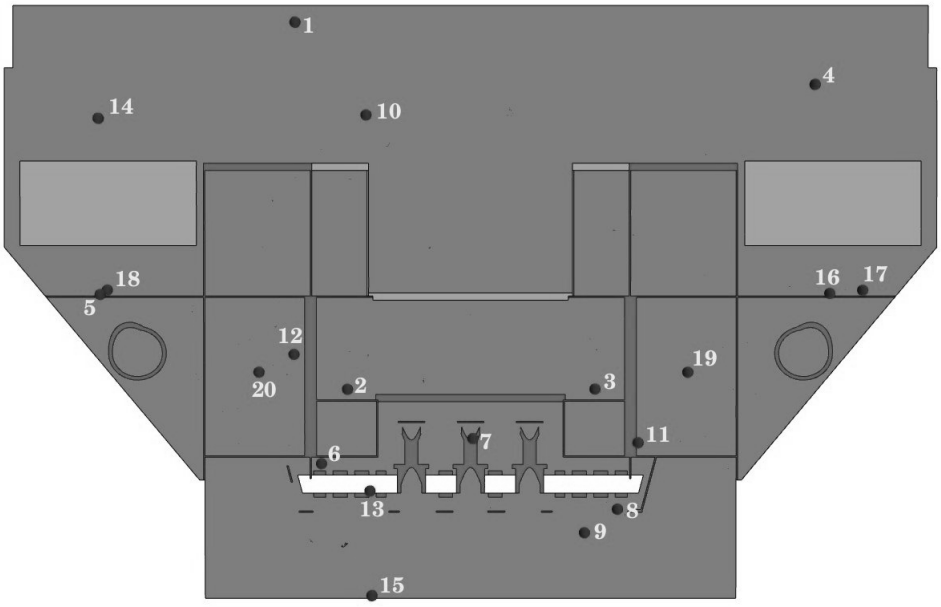

Рис. 8. Расположение точек сравнения результатов расчета и эксперимента (плоскость симметрии)

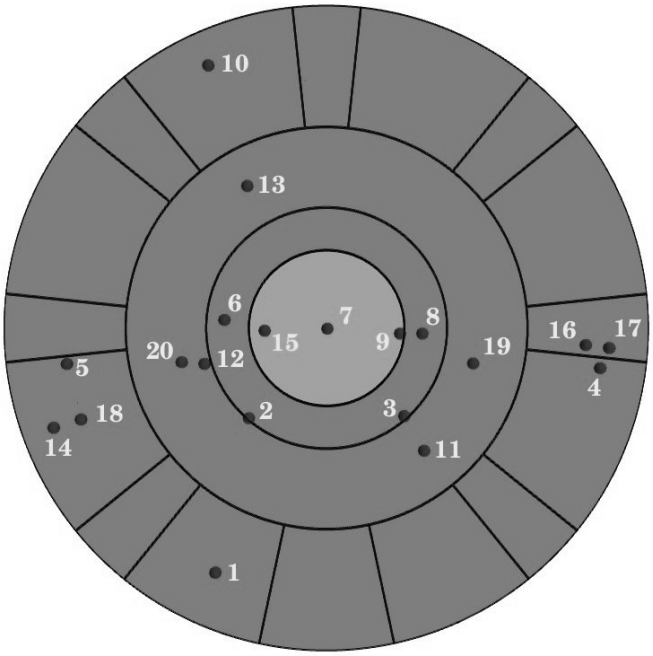

Рис. 9. Расположение точек сравнения результатов расчета и эксперимента (в основании напорных труб)

Таблица 3

Сравнение расчетных и экспериментальных температур *T*,°C

Точка \ Вариант	2		4		5	
	расчет	эксп.	расчет	эксп.	расчет	эксп.
1	58.6	55.4	56.4	56.0	60.9	55.2
2	58.7	55.9	56.4	56.7	61.0	55.3
3	56.4	55.3	56.5	51.8	56.6	54.1
4	56.5	56.0	56.8	62.6	57.3	56.4
5	56.5	55.6	56.9	55.2	57.2	55.6
6	62.4	57.1	62.0	62.0	65.4	58.9
7	57.3	58.4	58.1	63.3	58.1	59.3
8	58.1	57.5	61.1	60.2	58.3	58.6
9	56.6	54.5	57.8	57.8	58.1	57.0
10	59.7	55.5	56.4	56.1	62.3	54.9
11	56.5	56.5	56.7	60.3	57.4	56.8
12	56.7	57.8	57.6	60.9	57.6	57.6
13	56.6	56.0	57.0	59.3	57.8	57.8
14	57.8	55.8	56.4	54.4	60.8	55.4
15	56.6	43.7	56.8	60.9	57.9	47.5
16	56.4	54.4	56.4	51.6	56.7	54.6
17	56.4	54.0	56.4	51.4	56.8	54.6
18	56.4	49.3	56.5	50.2	56.7	52.2
19	56.6	57.1	58.2	61.8	57.6	57.8
20	56.6	57.8	58.2	61.8	57.6	57.6

расчетов и испытаний подтверждает достоверность компьютерного моделирования конвективных течений теплоносителя в стенде «Поддон».

Расчеты показывают, что для варианта 5 стационарная температура теплоносителя находится в диапазоне T = 57–70°C. Максимальные значения температуры наблюдаются в зоне нагревательных элементов, горячий шлейф от которых поднимается вверх. В верхней части стенда формируется развитый слой повышенной температуры: T ~ 61–64°C. Значительные периферийные зоны в среднем сечении стенда сохраняют относительно низкий уровень температуры: T ~ 57–58°C. Скорости конвективного потока достигают максимальной величины V ~ 0.246 м/сек и реализуются в вертикальном направлении в локальной зоне над нагревателями.

Качественная картина циркуляционных конвективных течений теплоносителя для варианта 4 близка по характеру к варианту 5. Однако непроницаемые плиты, расположенные в напорной камере, мешают развитию естественной циркуляции через напорную камеру. Значительную роль в охлаждении нагревателей играют вторичные контуры циркуляции, развивающейся в полостях стенда. Стационарная температура находится в диапазоне T = 56–95°C. Максимальные значения температуры теплоносителя достигаются в области нагревательных элементов, охлаждение которых затруднено. В верхней части стенда формируется развитый слой повышенной температуры: T ~ 58–61°C.

Выводы

В результате проведенных численных исследований стационарных термодинамических режимов в стенде «Поддон» с использованием ПС STAR CD получены поля распределений температуры и скорости в стенде при установившемся режиме работы. Анализ этих полей показал, что в стенде устанавливается циркуляция, обусловленная естественной конвекцией, что обеспечивает эффективное охлаждение нагревателя. Полученные результаты позволяют с приемлемой точностью оценить эффективность стенда в разных режимах работы при различных значениях степени перфорации нижней и верхней пластин.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для различных вариантов показало хорошее совпадение результатов. Среднее отклонение между результатами, полученными в ходе численного моделирования и эксперимента, составляет 5%.

Проведение расчетно-экспериментальных исследований теплогидравлических процессов в стенде «Поддон» позволяет верифицировать применяемые при проектировании и обосновании работоспособности поддона расчетные коды и доказывает применимость этой технологии к решению рассматриваемого класса задач.

Список литературы

1. Каманин Ю.Л., Рогожкин С.А., Соболев В.А. Устройство для сбора и охлаждения расплавленного топлива в реакторе БН-800. Доклад на совместном заседании рабочих групп № 6 и № 7 Росатом (Россия) – КАЭ (Франция), 16–19 октября, 2006, Обнинск, Россия.

2. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Соболев В.А., Шепелев С.Ф. Экспериментальные исследования в обоснование устройства для локализации расплавленного топлива реактора БН-800 // Сборник тезисов докладов межведомственного семинара «Теплофизика-2007». Обнинск: Изд-во ГНЦ РФ–ФЭИ, 2007.

3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

CFD AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMAL HYDRAULIC PROCESSES IN THE «PODDON» TEST-BED

S.A. Osipov, S.A. Rogozhkin, V.A. Sobolev, S.F. Shepelev, A.A. Kozhaev, M.S. Mavrin, A.A. Ryabov

A description is presented of the «Poddon» test-bed designed to model the core catcher in a BN-800 reactor accident beyond design basis with core meltdown. The test bench was used for experiments where water served as a coolant. CFD simulation of the modeled thermal hydraulic processes was performed using STAR-CD software complex. CFD and experimental results comparison is provided.

Keywords: reactor, heat exchanger, cooling system, natural convection, CFD, fluid dynamics, STAR-CD, STAR-CCM+.