

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ВЕРХНЕЙ КАМЕРЕ РЕАКТОРА MONJU

Фадеев И.Д.¹, Осипов С.Л.¹, канд. техн. наук, Рогожкин С.А.¹,
Шепелев С.Ф.¹, канд. техн. наук, Жлуктов С.В.², канд. физ.-мат. наук,
Сазонова М.Л.², канд. физ.-мат. наук

¹ ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия

² ООО «ТЕСИС», Москва, Россия

Введение

При расчетном исследовании течения натриевого теплоносителя в реакторе на быстрых нейтронах, необходимо учитывать специфику теплопереноса в жидких металлах. В программном комплексе (ПК) FlowVision была реализована модель турбулентного теплопереноса для натриевого теплоносителя LMS [1]. Модель верифицирована, посредством моделирования процессов перемешивания разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя, экспериментально исследованных на стенде TEFLU [1] и в верхней камере реактора БН-600 [2].

Для расширения круга верификационных примеров и дополнительного тестирования модели LMS применительно к задачам, максимально приближенным к реальным процессам в ПК FlowVision, было проведено численное моделирование процессов естественной и вынужденной конвекции натрия в верхней камере японского реактора MONJU.

Экспериментальные исследования

MONJU – реакторная установка (РУ) петлевого типа с реактором на быстрых нейтронах, в качестве теплоносителя используется жидкий натрий.

Схематическое изображение реактора приведено на рис. 1.

«Холодный» натрий поступает через входной патрубок в напорную камеру реактора. Через раздающий коллектор натрий подается в тепловыделяющие сборки (ТВС) активной зоны. Пройдя активную зону, натрий подогревается и поступает в верхнюю камеру, где омывает колонну системы управления и защиты (СУЗ). Поднимается вверх до зоны перелива разделительной обечайки и поступает в выходной патрубок. В результате петлевой компоновки РУ промежуточные теплообменники и циркуляционные насосы вынесены из бака реактора.

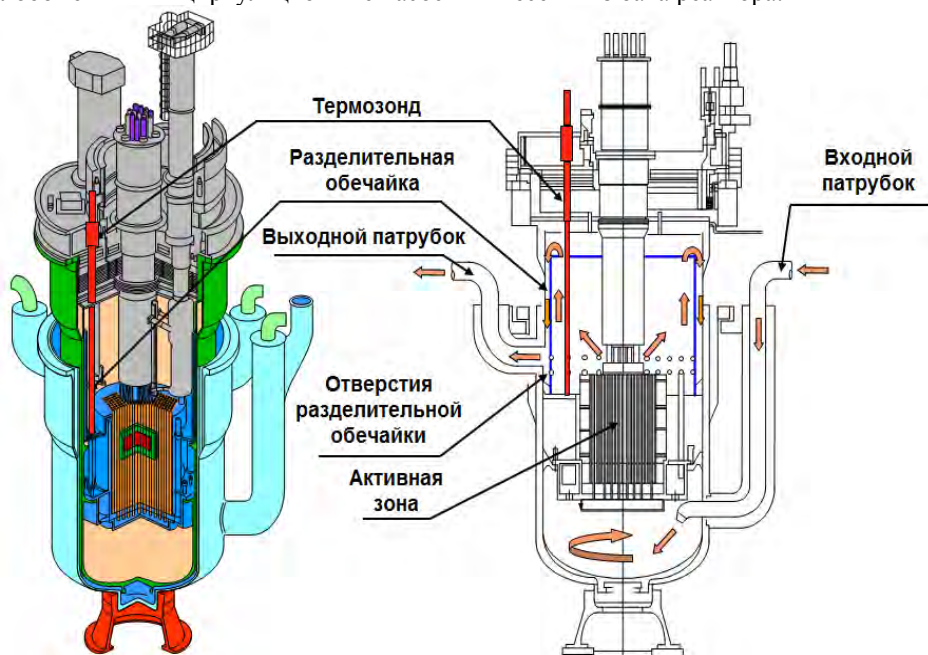


Рис. 1 – Схематическое изображение реактора MONJU

8 декабря 1995 года на реакторе MONJU был проведен эксперимент, который заключался в имитации аварии, вызванной отказом главного конденсатора, при работе реактора на уровне тепловой мощности 45 %. По сигналу «Отказ главного конденсатора» отключалась турбина, сбрасывались стержни аварийной защиты, а насосы первого и второго контуров переводились в режим аварийного расхолаживания. При этом в верхней камере реактора реализуется сложная картина течения и теплообмена вследствие одновременного действия сил вынужденной и естественной конвекции.

Конструктивные особенности верхней камеры

Основные элементы конструкции верхней камеры реактора MONJU представлены на рис. 2. Характерной особенностью камеры является наличие цилиндрической разделительной обечайки с двумя рядами отверстий, отделяющей основной объем верхней камеры от выходных патрубков и формирующей опускную щель. Еще одна особенность конструкции заключается в наличии крайне затесненной надзонной области, состоящей из направляющих регулирующих стержней, подводящих трубок (ПТ), перфорированной плиты (ПП) и чехлов надзонных термпар (НТ).

Азимутальную асимметрию в конструкцию вносит перегрузочная машина.

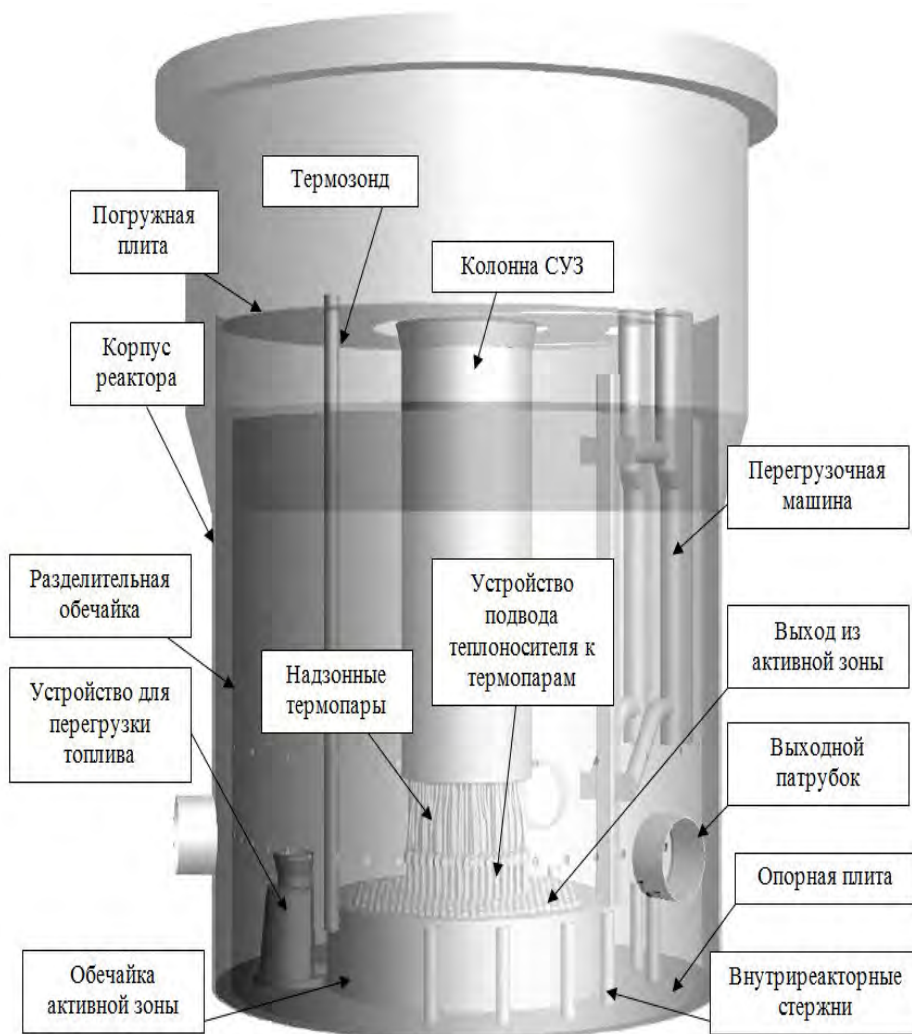


Рис. 2 – Конструкция верхней камеры реактора

Измерение температуры, в верхней камере реактора, проводилось с использованием термозонда, который также расположен не симметрично по отношению к выходным патрубкам. Расположение термозонда и контрольных термопар термозонда представлено на рис. 3. Измерения проводились с интервалом 0.1 с. Каждое значение температуры определено как среднее за 1 с.

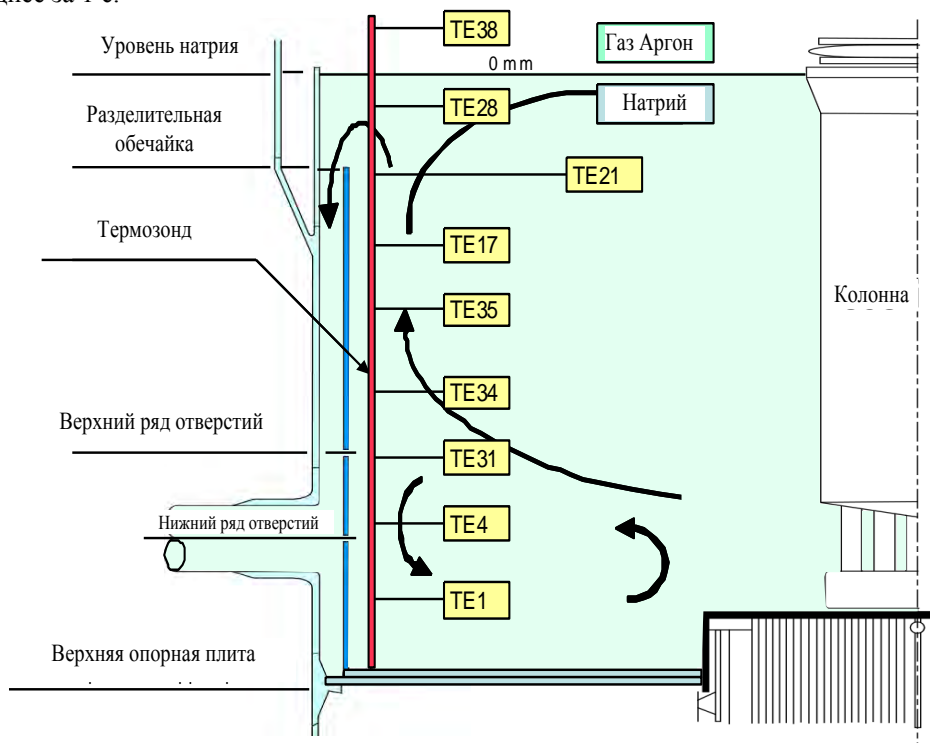


Рис. 3 – Расположение термозонда и термопар

Постановка задачи для расчета в ПК FlowVision

Постановка задачи, выбор геометрии, граничные условия, были приняты в соответствии с проведенным бенчмарком по реактору MONJU [3]. Численное моделирование процессов в верхней камере реактора выполнялось для сектора 60° (рис. 4). Для выполнения расчетов был необходим учет затесненной надзонной области. Явное моделирование надзонной области приведет к усложнению геометрии и увеличению размера сетки, поэтому было принято моделировать эту область пористым телом (анизотропная пористость) за исключением перфорированной плиты, которая была введена явным образом в упрощенной постановке.

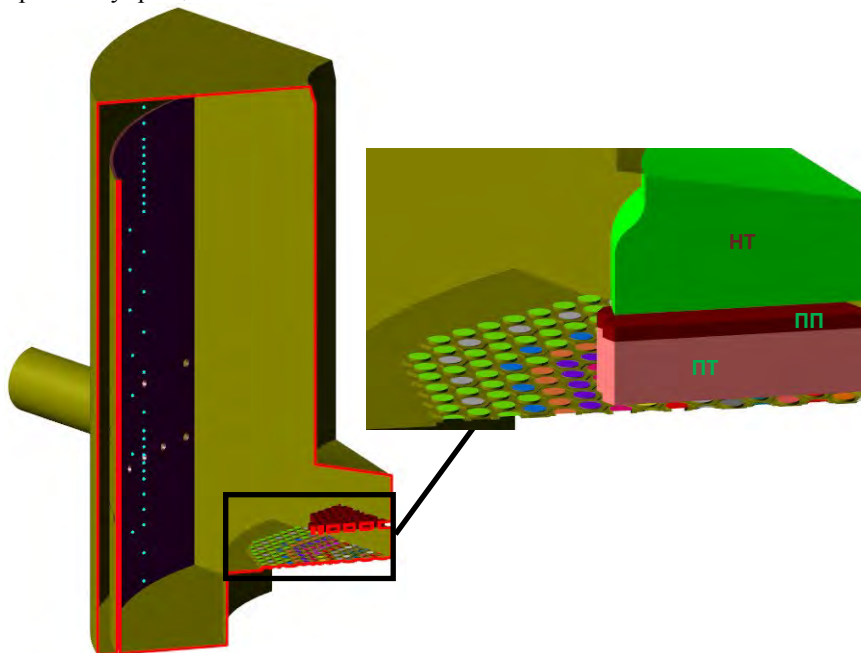


Рис. 4 – Расчетная модель

В расчетах задавалась равномерная начальная сетка с дополнительным локальным измельчением (адаптацией) в определённых зонах для более детального моделирования течения теплоносителя:

- в области над активной зоной применена адаптация 1 уровня;
- вблизи стенок ПП и отверстий разделительной обечайки определен второй уровень адаптации;
- вблизи стенок конструкции расчетная сетка проадаптирована до 1 уровня.

Оптимальная расчетная сетка была получена путем исследования сходимости результатов по сетке.

На рис. 5 показано разбиение активной зоны на условные каналы. Для каждого из каналов приводились экспериментальные значения усредненных расходов и выходных температур, которые были использованы для задания входных граничных условий [4]. На выходе было задано условие нулевых возмущений по статическому давлению. На отсекающих сектор плоскостях, а также на верхней границе расчетной области, моделирующей поверхность раздела «натрий-аргон», определено условие симметрии. На всех стенках конструкции задано условие не протекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательной компоненты скорости.

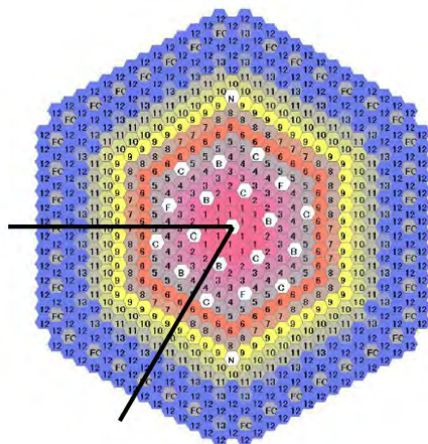


Рис. 5 – Компонка ТВС активной зоны

Моделирование выполнено для двух режимов работы реактора MONJU:

- для номинального режима определен профиль температуры по высоте камеры реактора в месте расположения термозонда;
- в режиме расхолаживания получены изменения (с течением времени) температуры жидкого натрия в точках расположения термопар термозонда.

Результаты расчета. Номинальный режим

Результаты расчета номинального режима работы реактора в ПК FlowVision представлены на рис. 6,7. Распределения характеристик (поля) течения даются в контрольной плоскости. Профиль температуры по высоте камеры приводится в месте расположения термозонда.



Рис. 6 – Поля температуры и скорости в контрольной плоскости

Основной поток натрия, проходя надзонную область, движется от основания колонны СУЗ к внутренней стенке разделительной обечайке. Далее часть потока поднимается вверх вдоль стенки и попадает в канал между обечайкой и корпусом реактора.

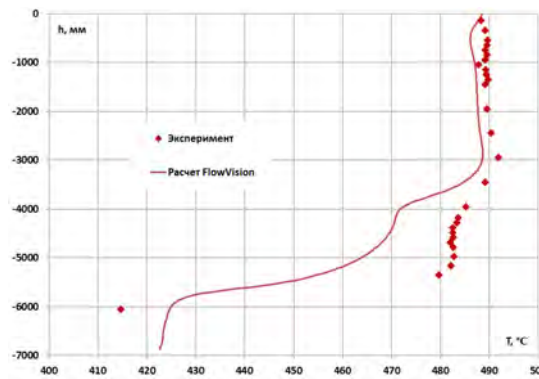


Рис. 7 – Распределение температуры по высоте камеры

Отличие рассчитанных значений температуры от экспериментальных в точках установки верхних датчиков ($h > -3500$ мм) менее 3%. В нижней части термозонда измеренные в эксперименте значения больше на 10-15%.

На рис. 8 показаны результаты расчета при различных положениях термозонда. Из распределения температуры по высоте видно, что течение в камере – трёхмерное, и смещение термозонда по угловой координате, приводит к заметному изменению профиля температуры.

Распределение температуры, полученное с использованием модели турбулентного теплопереноса LMS и при задании постоянного турбулентного числа Прандтля (Pr_t) в диапазоне от 0,5 до 2 отличаются не более чем на 25°C (рис. 9). При «отключении» турбулентного теплопереноса ($Pr_t = 1\ 000\ 000$), картина течения резко меняется: отклонение потока к внутренней оболочке не наблюдается.

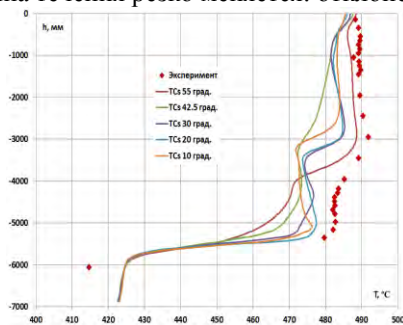


Рис. 8 – Распределение температуры при различных положениях термозонда

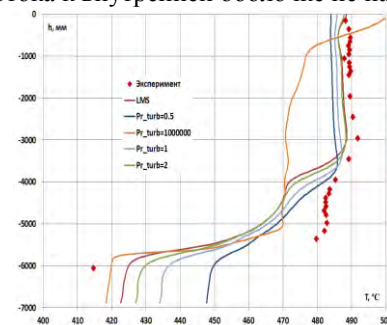


Рис. 9 – Распределение температуры при различных Pr_t

Результаты расчета. Режим расхолаживания

На рис. 10 представлена картина течения в контрольной плоскости для моментов времени 120 и 600с от начала процесса расхолаживания.

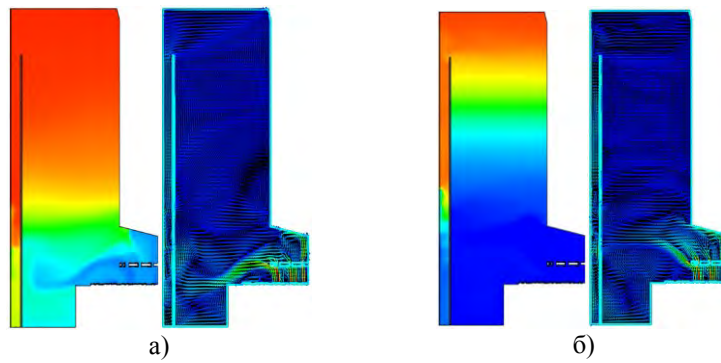


Рис. 10 – Поля температуры и скорости: а) 120 с, б) 600 с

Также, в результате расчета, получены распределения температуры по высоте камеры реактора, в сравнении с экспериментальными данными для режима расхолаживания (рис. 11). Результаты расчета изменения температуры в нижней части камеры ($h < -3500$ мм) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Верхняя часть камеры, в процессе расхолаживания, по расчету в ПК FlowVision охлаждается быстрее, чем в эксперименте, отличие в результатах до 30 %. Это может быть связано с тем, что при моделировании не учитывается теплообмен потока с элементами конструкции в надзонной области.

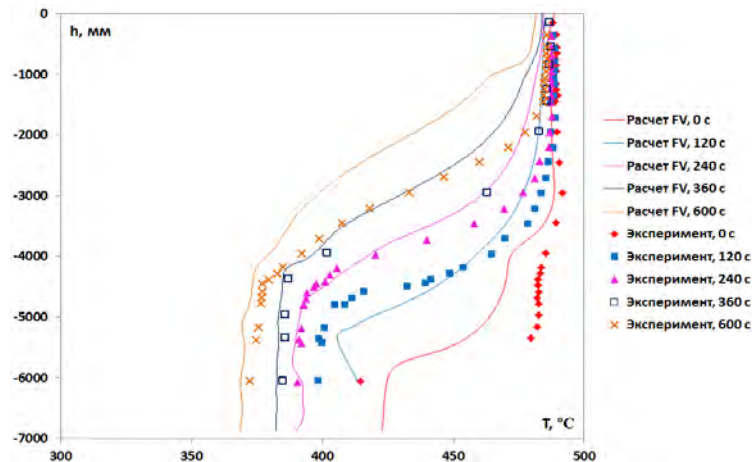


Рис. 11 – Распределение температуры по высоте камеры

Заключение

В ПК FlowVision, с использованием модели LMS, выполнено численное моделирование процессов естественной и вынужденной конвекции натрия в верхней камере реактора MONJU.

Результаты численного моделирования в ПК FlowVision удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, как в номинальном режиме, так и в режиме расхолаживания.

Отличие рассчитанных в номинальном режиме значений температуры от экспериментальных, в точках установки верхних датчиков ($h > -3500$ мм) менее 3%. В нижней части термозонда измеренные в эксперименте значения больше на 10-15 %.

Показания датчиков температуры, полученные в результате моделирования в FlowVision первых 240с режима расхолаживания, отличаются от экспериментальных данных менее чем на 10 %. С течением времени (360 с и 600 с), уменьшение рассчитанной температуры в верхней части камеры, происходит быстрее, чем при измерении в эксперименте: отличие в показаниях датчиков до 30 %. В нижней части камеры ($h < -4000$ мм) погрешность расчета температуры менее 7 %.

Список литературы

1 Жлуктов С.В., Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Сазонова М.Л., Фадеев И.Д., Шепелев С.Ф. Разработка модели LMS для учета турбулентного теплопереноса в натриевом теплоносителе и ее тестирование // Тезисы докладов Международного форума «Инженерные системы-2012», Москва, 2012 – 60 с.

2 Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф., Сазонова М.Л., Шмелев В.В. Опыт применения и проблемы верификации CFD кодов в проектах реакторов БН // Сборник тезисов научно-технического семинара «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике», Н.Новгород, 2012.

3 H. Ohira, Y. Xu, U. Bieder et al. Benchmark Analyses of Sodium Natural Convection in the Upper Plenum of the MONJU // International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13), Paris, France, 2013.

4 FBR Plant Technology Unit: Complementary descriptions for detailed boundary conditions. Presented at: First (Kick-off) Research Coordination Meeting (RCM) of the IAEA Coordinated Research Project (CRP) on “Benchmark Analyses of Sodium Natural Convection in the Upper Plenum of the MONJU Reactor Vessel”. 22-24 September 2008, IAEA Headquarters, Vienna.