

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРХНЕЙ КАМЕРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Ю.Е. Швецов

*Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск*

Надежность и безопасность эксплуатации ядерного реактора в значительной степени обеспечивается сохранением целостности его корпуса в переходных и аварийных режимах. В свою очередь прочностные характеристики корпуса во многом зависят от температурных условий, при которых корпус эксплуатируется. Наиболее жесткие с этой точки зрения условия реализуются в верхней камере ядерного реактора, поскольку именно здесь наблюдается наиболее высокий уровень температуры, а в переходных режимах появляется возможность термоциклирования материала корпуса. Поэтому задача адекватного расчета полей скорости и температуры теплоносителя в верхней камере ядерного реактора приобретает особую актуальность, а верификация теплогидравлических кодов, используемых для расчетного анализа теплогидравлических процессов в верхней камере, становится важной задачей. Особенно ценно, когда верификация осуществляется на экспериментальных данных, полученных непосредственно на действующих реакторах. В России для анализа переходных и аварийных режимов на быстрых реакторах широко используется код GRIF [1]. GRIF - это однофазный комплексный теплогидравлический код, предназначенный для расчета динамики теплогидравлических параметров в жидкометаллическом ядерном реакторе, как в стационарных, так и в переходных режимах. Особенностью кода является возможность использования моделей разной геометрической размерности для различных элементов реактора и возможность моделирования теплогидравлических процессов не только в основном тракте реактора, но и в межпакетном пространстве. Из опыта анализа переходных и аварийных режимов известно, что при обосновании безопасности быстрых реакторов возникает целый ряд прикладных задач, в которых учет тепломассообмена с межпакетным пространством оказывается важным [2].

Код GRIF содержит следующие основные модули:

- трехмерная теплогидравлическая модель для расчета полей скорости натрия, давления и температуры в первом контуре реактора, основанная на модели «пористого тела»;
- трехмерная модель для расчета полей скорости натрия, давления и температуры в межпакетном пространстве активной зоны;
- набор 1D, 2D и 3D моделей для вычислений температурных полей в «непроницаемых» элементах (твэлах, чехлах ТВС и т.д.);
- теплогидравлическая модель промежуточного и аварийного теплообменников;
- модель насоса первого контура;
- 1D модель второго контура;
- 1D модель системы аварийного отвода тепла от реактора;
- точечную модель нейтронной кинетики.

Основу программы составляет теплогидравлический модуль, в котором рассчитываются трехмерные поля скорости давления и температуры теплоносителя первого контура в цилиндрической r-φ-z геометрии. Система уравнений тепломассообмена записывается в рамках модели пористого тела. Жидкость считается несжимаемой, эффекты стратификации учитываются в приближении Буссинеска. Ниже приведена эта система уравнений:

$$(\vec{\nabla} \varepsilon \vec{U}) = J$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon} (\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) \cdot \varepsilon \vec{U} = -\frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} P + (\vec{\nabla} \nu_{eff} \vec{\nabla}) \cdot \vec{U} + J \cdot \vec{U}_J + \vec{F}$$

$$c_p \rho \cdot \left[ \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\vec{\nabla} \varepsilon \vec{U}) \cdot T \right] = (\vec{\nabla} \lambda \vec{\nabla}) \cdot T + J \cdot c_p \rho \cdot T_J + Q,$$

$$\text{где} \quad \vec{F} = -\frac{\rho(\tau)}{\rho_0} \vec{g} - \Lambda^T \left( \left| \vec{U} \right| \right) \cdot \vec{U} \quad Q = \alpha \frac{\Pi}{S} (\Theta - T) + q_v$$

Принятые обозначения:

$\vec{U}$  - скорость теплоносителя;  $\varepsilon$  - пористость среды по теплоносителю;  $\nu_{eff}$  - эффективная кинематическая вязкость;  $\rho$  - плотность теплоносителя;  $\Lambda^T$  - тензор коэффициентов сопротивления пористой среды;  $P$  - давление;  $T$  - температура;  $C_p \rho$  - удельная теплоемкость теплоносителя;  $\lambda$  - тензор эффективных коэффициентов теплопроводности;  $q_v$  - удельное объемное энерговыделение,  $\alpha \frac{\Pi}{S} (\Theta - T)$  - член, учитывающий теплообмен с конструкциями, контактирующими с теплоносителем первого контура;  $J$  - источник (сток) массы за счет массообмена с межпакетным пространством;  $U_J$  - скорость межпакетного натрия, а  $T_J$  его температура.

Для описания теплогидравлики межпакетного натрия используется та же система дифференциальных уравнений, что и для основного тракта (уравнения (1)-(5)) однако решается она для подобласти, покрывающей часть реактора, где имеется межпакетный натрий.

Система уравнений модели решается численно итерационным методом, изложенным в работе [3].

Ранее код уже прошел верификацию на следующем наборе экспериментов.

– Вынужденное струйное течение в кубической полости. [4]. (Сравнивались экспериментальные и расчетные профили скорости изотермической жидкости в различных поперечных сечениях кубической полости).

– IANR-эталонный тест по анализу явлений расслоения в полости, моделирующей типичную геометрию верхней камеры быстрого реактора. [5] (Выполнено сравнение измеренных и рассчитанных профилей скорости и температуры в модели верхней камеры реактора).

– Неизотермическое течение натрия в 169-стержневом электрообогреваемом пучке с “угловыми” и “центральными” блоками проходного сечения [6]. (Сравнивались распределения температуры натрия в горизонтальных сечениях сборки на разном удалении от блокады)

– Эксперименты на стенде RAMONA. Экспериментально исследуется возможность отвода тепла от «активной зоны» реактора интегрального типа с помощью аварийных теплообменников погружного типа, размещенных в верхней камере «реактора» [7,8]. (Выполнено сравнение нестационарных полей скорости и температуры в реакторной модели в условиях сложной внутренней геометрии исследуемого объекта и при совместном действии принудительной и естественной конвекции).

– БН-600. Эксперимент по измерению динамики температур в верхней камере реактора после сброса стержней АЗ (Данные получены на Белоярской АЭС, выполнено сравнение расчетных температур на выходе из активной зоны реактора с показаниями штатных термопар).

– БН-600. Эксперимент по измерению динамики температур в первом контуре реактора в режиме перехода на естественную циркуляцию натрия (Данные получены на Белоярской АЭС, выполнено сравнение расчетных температур с показаниями штатных термопар).

Однако спектр прикладных задач, для решения которых применяется код, достаточно

широк, как широк и спектр явлений, которые необходимо адекватно моделировать при их решении. Особенно ценной является верификация кода на данных, полученных не на стендах, а на действующих реакторах. Ниже приводятся результаты верификации кода GRIF на экспериментальных данных, полученных на японском реакторе MONJU.

### Расчетный анализ нестационарного теплообмена в верхней камере реактора MONJU

*Описание эксперимента, выполненного на реакторе MONJU.* MONJU – это японский демонстрационный быстрый реактор петлевого типа, охлаждаемый натрием [9]. В декабре 1995 года на реакторе был выполнен эксперимент, в ходе которого имитировалась авария, инициируемая отказом главного конденсатора. В исходном состоянии реактор работал на уровне мощности 45%. Иницирующий отказ сопровождался следующей цепочкой событий:

- закрытие стопорных клапанов турбины;
- сброс стержней аварийной защиты;
- останов всех главных циркуляционных насосов первого контура и
- ввод в работу вспомогательных насосов, обеспечивающих в первом контуре относительно малый расход теплоносителя.

Данный режим представляет особый интерес с точки зрения обоснования прочностных характеристик корпуса реактора. Изменение расхода по первому контуру и мощности реактора вызывает перестройку поля скорости и температуры в верхней камере реактора, что как известно, может привести к дополнительному температурному нагружению корпуса реактора. В ходе выполнения теста измерялись расход через активную зону, температура натрия на выходе из каждой тепловыделяющей сборки (ТВС) и распределение температуры по высоте верхней камеры реактора [10]. На рисунках 1, 2 в качестве примера показаны результаты измерений расхода теплоносителя по первому и второму контуру и температуры натрия на выходе из ряда ТВС в ходе теста [11].

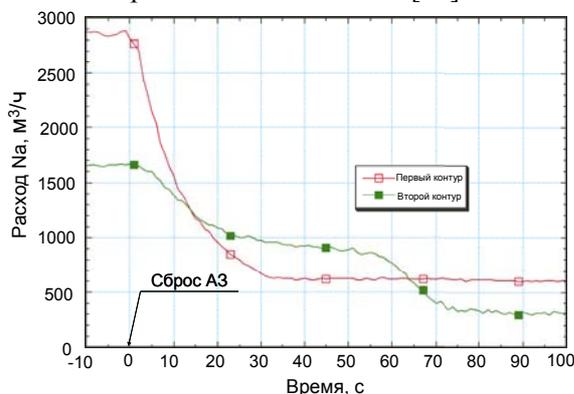


Рис. 1. Расход натрия по первому и второму контурам

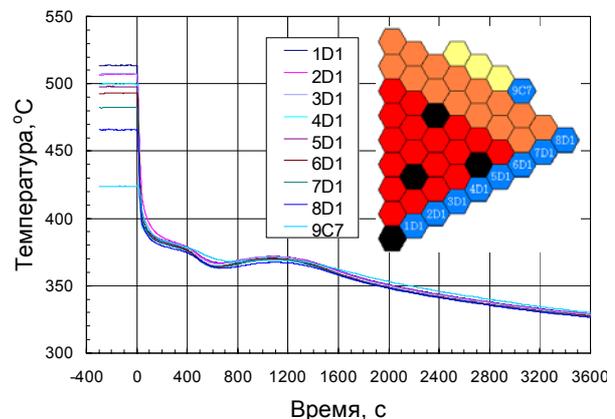


Рис. 2. Температура натрия на выходе из ТВС

*Конструкция верхней камеры реактора MONJU.* Верхняя камера реактора MONJU имеет достаточно сложную конструкцию (рис. 3) [12]

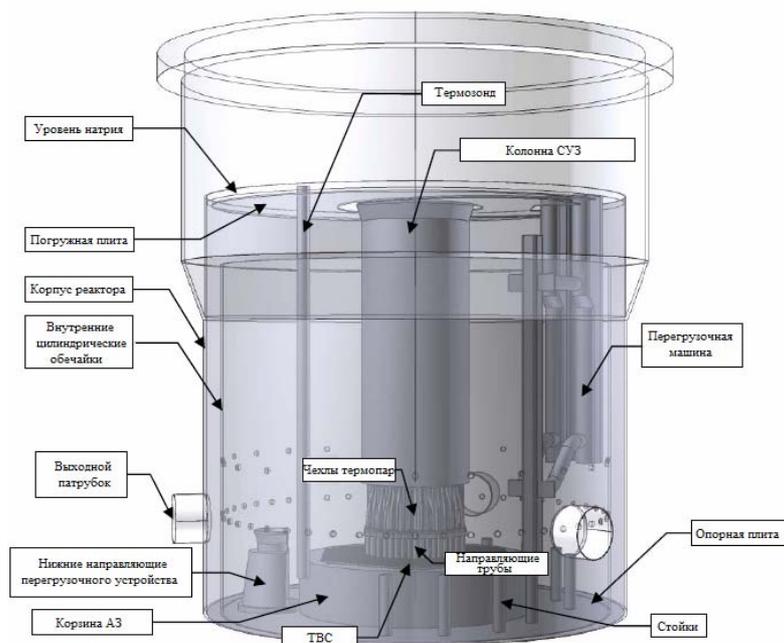


Рис. 3. Верхняя камера реактора MONJU

Поток натрия, выходящий из ТВС активной зоны, сначала поступает в надзонное пространство. Характерной особенностью надзонного пространства является его чрезвычайная затесненность элементами конструкции – чехлами термопар, контролирующими температуру натрия на выходе из ТВС, и направляющими чехлами стержней СУЗ. Далее теплоноситель поступает в кольцевое пространство, образованное внешней поверхностью колонны СУЗ и внутренней цилиндрической обечайкой, отделяющей основной объем верхней камеры от выходных патрубков реактора. Обечайка и корпус реактора образуют кольцевой опускной зазор. При работе реактора на энергетических режимах мощности натрия в верхней камере движется преимущественно вверх, и, переливаясь через верхнюю кромку, поступает в кольцевой зазор, а затем – в выходные патрубки. Только незначительная часть натрия поступает в кольцевой зазор через нижний и верхний ряды отверстий в обечайке. Однако при снижении общего расхода начинает все более существенную роль играть стратификация разнагретого теплоносителя в объеме верхней камеры, что оказывает влияние и на соотношение потоков натрия по трем вышеуказанным «трактам». Перераспределение потоков в свою очередь влияет на поле температуры в камере. Поле температуры по высоте камеры контролируется термозондом, оснащенным 36 термопарами.

Таким образом, с одной стороны в данном эксперименте в верхней камере реактора реализуется достаточно сложный режим течения в условиях непростой внутренней геометрии объекта, а с другой - обеспечивается детальный мониторинг распределения температуры по высоте камеры. Поэтому полученные в ходе теста результаты измерений представляют собой хорошие данные для верификации теплогидравлических кодов.

*Расчетная модель верхней камеры.* Модель верхней камеры реактора MONJU включает в себя по углу сегмент с раствором угла  $60^\circ$ , а по высоте охватывает область между опорной плитой и верхней погруженной плитой. Большое цилиндрическое тело колонны СУЗ представлено явным образом в расчетной модели, но ее теплообмен с омывающим потоком натрия не учитывается. Остальные элементы, расположенные между дном колонны СУЗ и выходными головками ТВС, представлены в рамках модели пористого тела. Отверстия во внутренней обечайке описаны явно, но с использованием только одного элемента сетки на одно отверстие. Моделируемая 1/6 часть верхней камеры реактора MONJU покрыта следующей неоднородной (R\*Z\*Fi)-сеткой - (34\*44\*25). Индексы сетки соответственно имеют обозначения: (i,k,j). Одно из вертикальных сечений расчетной области приведено на рисунке 4а, на рисунке 4б показаны горизонтальные сечения.

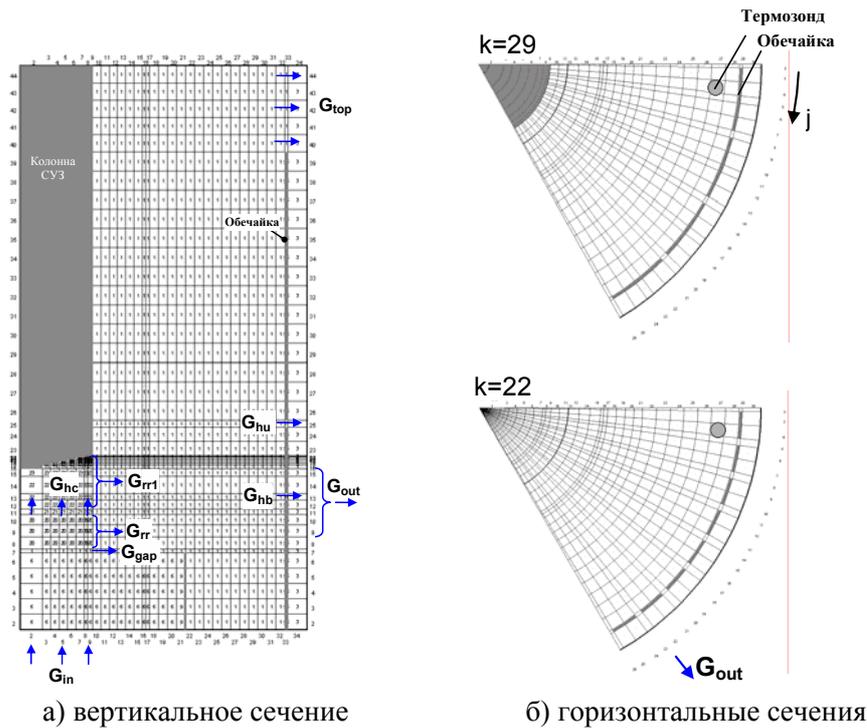


Рис. 4. Расчетная область реактора MONJU

*Анализ влияния общего расхода через реактор на режим течения в верхней камере.*

Первые пробные расчеты полей скорости и температуры в камере в исходном стационарном состоянии показали существенное отличие картины течения, предсказываемой кодом GRIF от результатов других авторов. Это, например, видно из рисунка 5а и 5б, где полученные по GRIF результаты сравниваются с расчетными результатами авторов Камиде и Ошима [11].

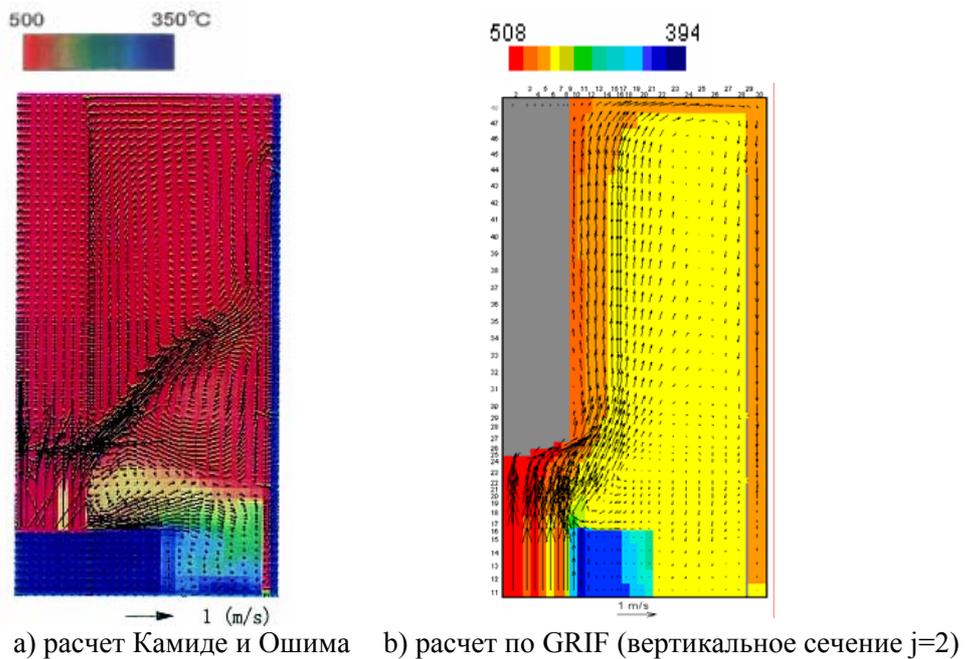


Рис. 5. Поля скорости и температуры в исходном стационарном состоянии

Поля течения заметно отличаются друг от друга. GRIF предсказывает формирование «режима восходящего потока», когда горячий натрий выбрасываемый из-под днища колонны движется преимущественно вверх, омывая внешнюю поверхность колонны СУЗ, и в результате в объеме верхней камеры формируется один большой вихрь. Другую картину течения, которую

можно назвать «струйным режимом течения», предсказывают расчеты авторов Камиде и Ошима. В этом случае струя, выбрасываемая из-под днища, пересекает пространство верхней камеры, разделяя ее на две рециркуляционные зоны. В результате и поля температуры для рассматриваемых вариантов оказываются различными.

Чтобы выяснить причины столь существенных различий, был выполнен параметрический анализ влияния на картину течения следующих параметров:

- Общего расхода через активную зону в диапазоне  $G=0,4 \div 2,0 \cdot G_0$ , где  $G_0$  – расход в условиях «ЕЦ-теста».
- Пространственного распределения скорости и температуры в камере, выбираемого в качестве начального приближения.

Последовательность расчетов всех вариантов показана на рис. 6, а примеры расчета полей скорости и температуры для отдельных вариантов – на рис. 7.

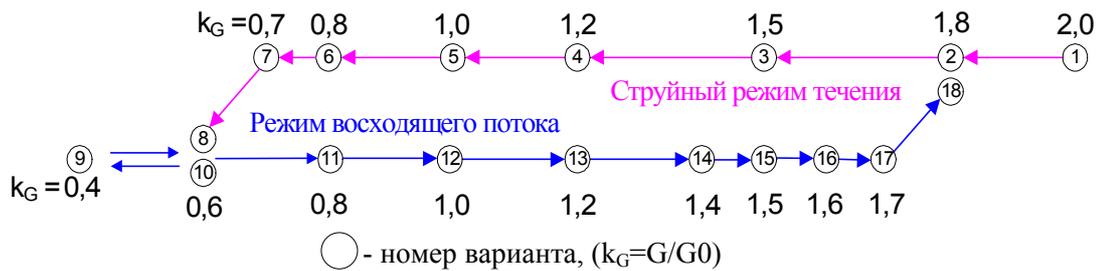
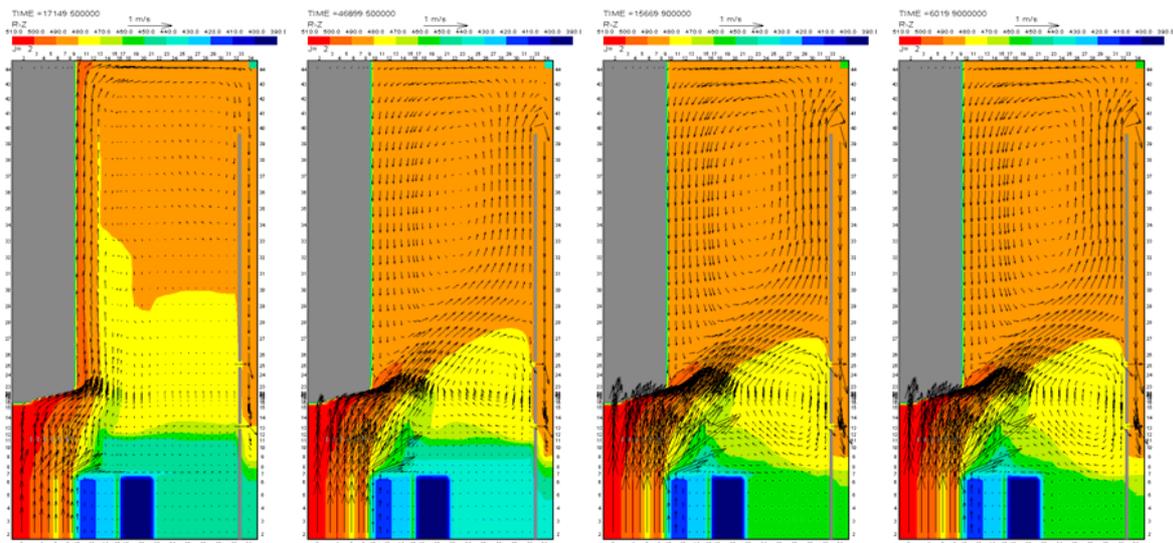


Рис. 6. Диаграмма, иллюстрирующая последовательность расчетов

Расчеты были начаты с варианта 1, в котором расход натрия в 2 раза превышал расход в «ЕЦ-тесте», и расчеты по GRIF для данного варианта показали ярко выраженный «Режим струйного течения». Затем для последующих расчетов полученные в варианте 1 распределения скорости и температуры были взяты в качестве начального приближения, и общий расход постепенно снижался. В итоге для вариантов со 2-ого по 7-ой в результате расчета получались «Режимы струйного течения», но после перехода к варианту 8 ( $G=0,6 \cdot G_0$ ) режим течения в камере сменился на «Режим восходящего потока». Затем в следующей серии расчетов в качестве начального приближения были выбраны поля скорости из варианта 9 – ярко выраженный «режим восходящего потока», и в последующих вариантах расход через активную зону вновь увеличивался. В итоге «режим восходящего потока» сохранялся вплоть до варианта 17 ( $G=1,7 \cdot G_0$ ) и сменился на «Режим струйного течения» только при переходе к варианту 18 ( $G=1,8 \cdot G_0$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что в диапазоне расходов  $G=0,7 \div 1,7 \cdot G_0$  задача имеет одновременно два решения, и какое из них реализуется в расчете, зависит от задаваемого начального приближения (Рис. 7) Не исключено, что наблюдаемая неоднозначность решения отражает реальную неоднозначность режима течения в камере.



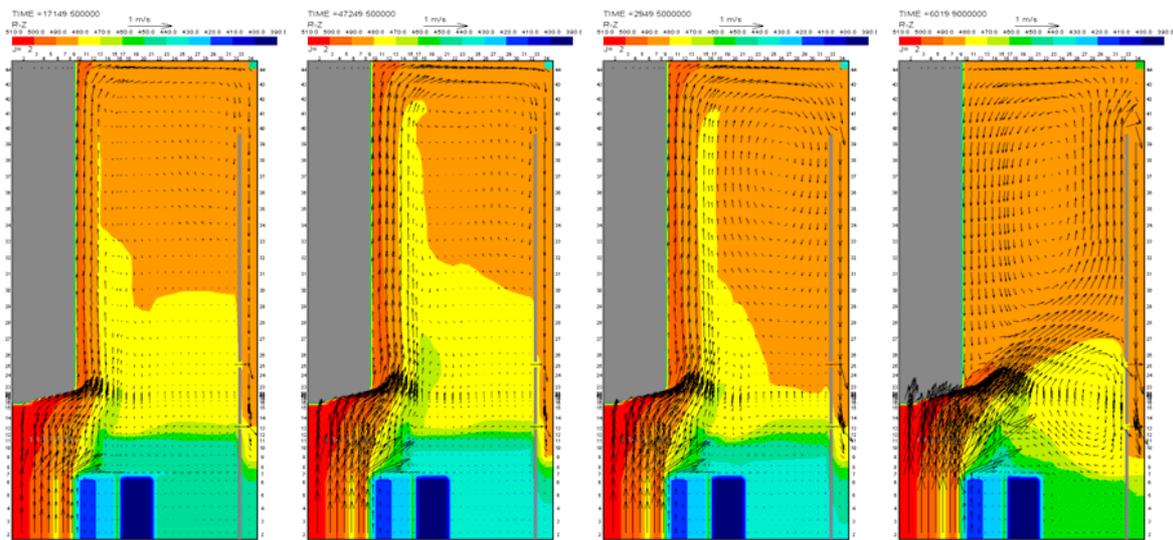
$k_G = 0,6$

$k_G = 1,0$

$k_G = 1,5$

$k_G = 1,8$

а) начальное приближение - «Режим струйного течения»



$k_G = 0,6$

$k_G = 1,0$

$k_G = 1,5$

$k_G = 1,8$

б) начальное приближение - «Режим восходящего потока»

Рис. 7. Стационарные поля скорости и температуры в различных вариантах, расчет по GRIF ( $k_G = G/G_0$ )

*Тепломассообмен в верхней камере в переходном режиме.*

Наложение сил вынужденной и естественной конвекции ведет к значительной перестройке потоков в верхней камере (рис. 8) по мере снижения общего расхода через реактор. Уже через 2 минуты происходит полное расслоение натрия в камере с образованием «горячей пробки» в ее верхней части. Далее граница пробки движется вверх, пока не достигнет верхней кромки внутренней кольцевой обечайки.

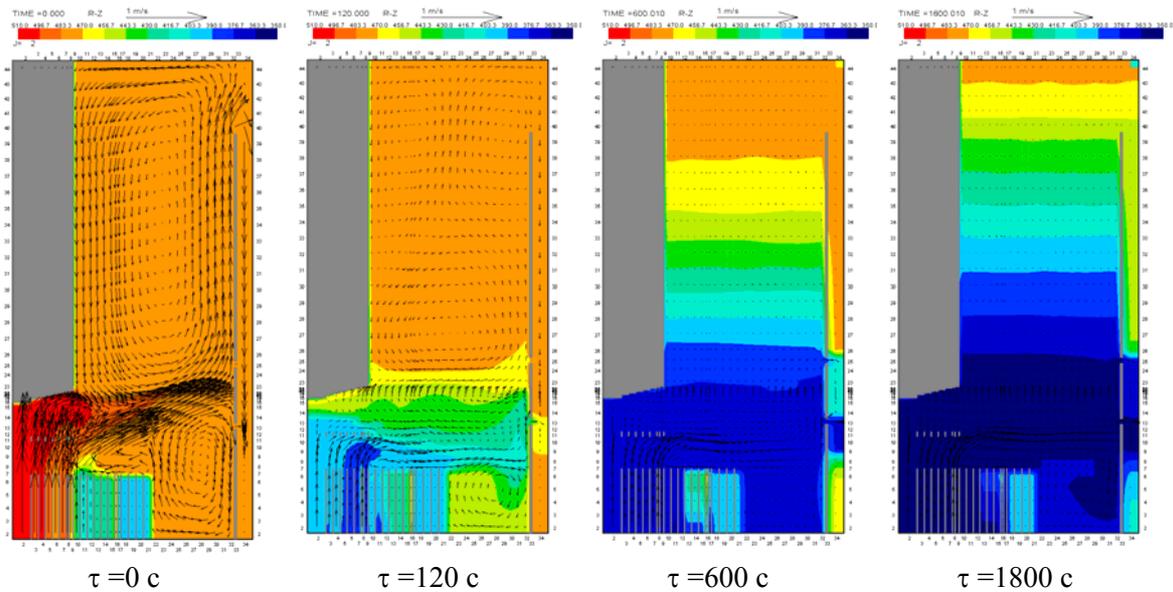


Рис. 8. Поля скорости и температуры в различные моменты времени (Расчет по GRIF)

Скорость движения фронта стратификации определяется соотношением потоков натрия по упомянутым выше трем трактам – через нижний ряд отверстий, через верхний ряд отверстий и через зазор над верхней кромкой внутренней обечайки. В исходном состоянии 95% поступившего в камеру натрия покидает его через зазор над верхней кромкой внутренней обечайки (рис. 9). Однако общий расход через реактор быстро падает, и образовавшаяся «горячая пробка» почти полностью блокирует расход по данному пути. В итоге на протяжении всей фазы процесса, пока в камере существует температурное расслоение, большая часть натрия покидает объем верхней камеры через отверстия в обечайке (около 60% через нижний ряд и около 30% через верхний) и только менее 10% общего расхода приходится на поток через зазор над верхней кромкой обечайки.

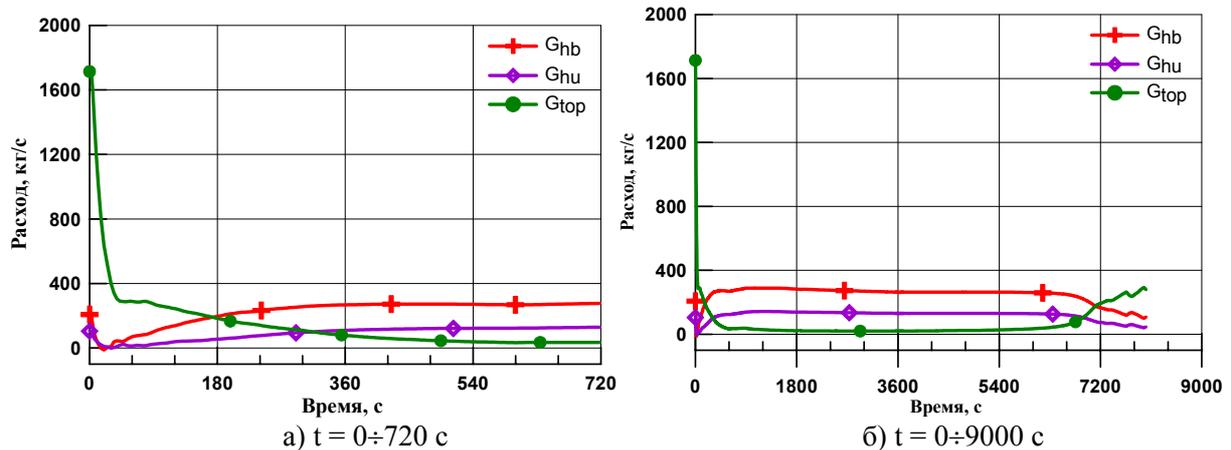


Рис. 9. Распределение выходящих из верхней камеры потоков натрия по трем трактам: через нижний ряд отверстий ( $G_{hb}$ ), через верхний ряд отверстий ( $G_{hu}$ ) и через зазор над верхней кромкой внутренней обечайки ( $G_{top}$ )

Фаза стратификации в основном заканчивается через два часа после начала переходного процесса (рис. 10). Поле температуры в верхней камере становится однородным всюду, кроме самого верхнего слоя, где образуется застойная зона.

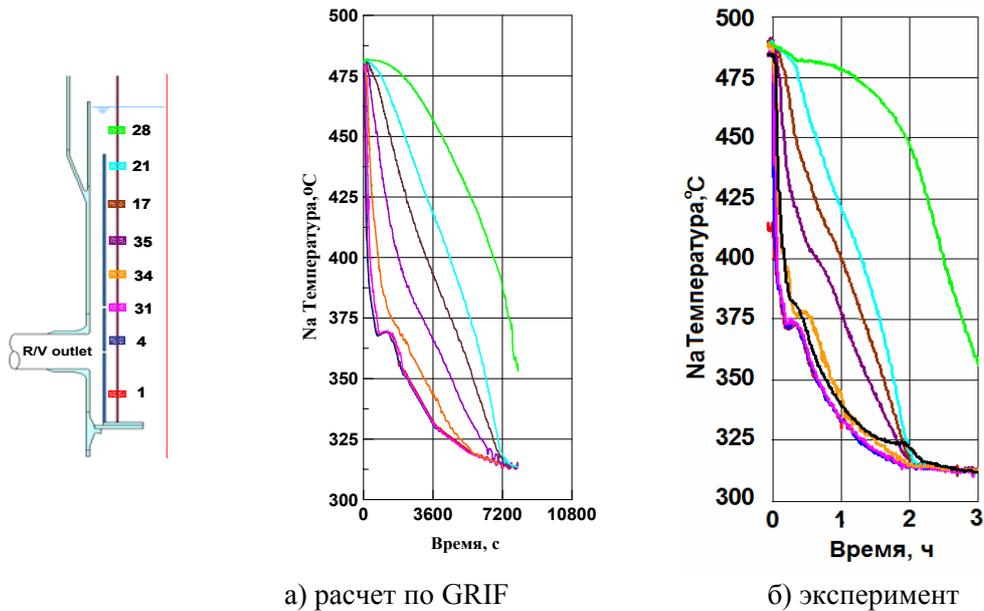


Рис. 10. Динамика показаний отдельных термопар термозонда

Следует отметить удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных кривых на рис 10. Непосредственное сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры в отдельных точках измерения выполнено на рис. 11

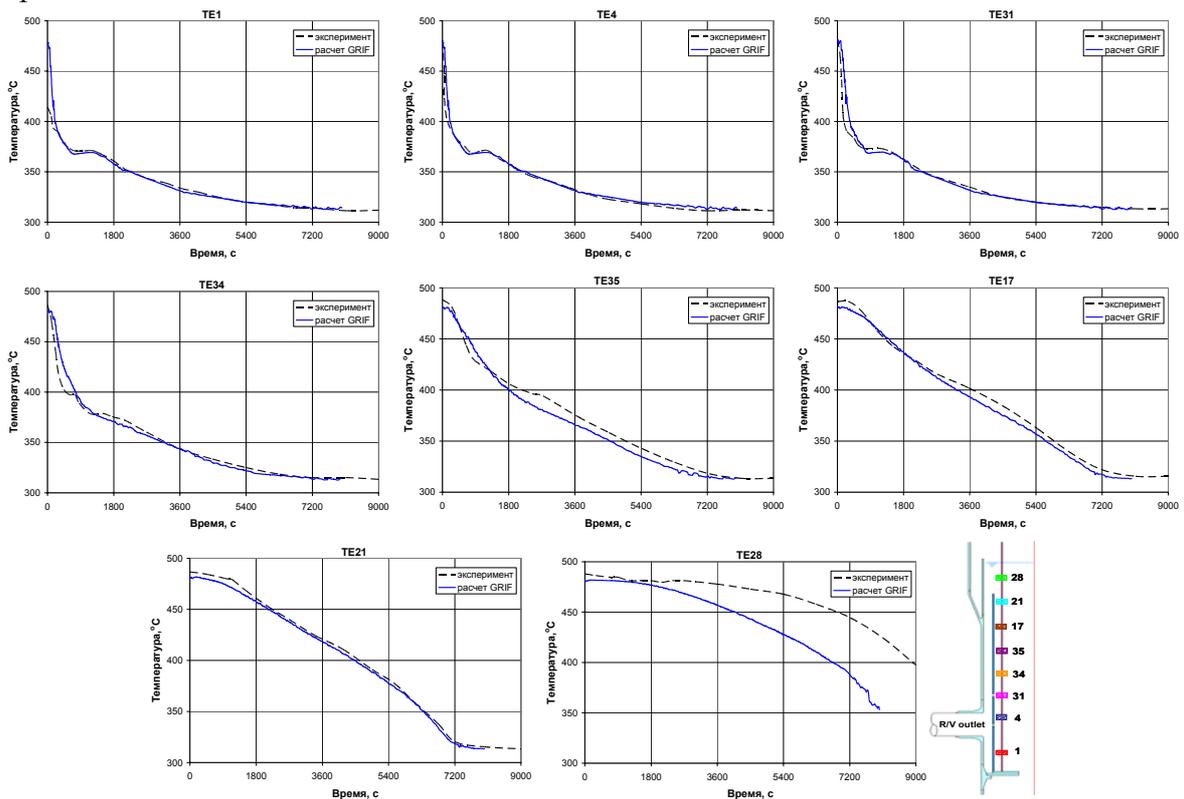


Рис. 11. Сравнение расчетных и экспериментальных значений показаний термопар.

Значительное расхождение наблюдается только для одной термопары, расположенной выше верхней кромки обечайки, именно там, где образуется застойная зона и дольше всего сохраняется стратифицированное состояние. Возможным объяснением причины данного расхождения с экспериментом может быть слишком

грубая разностная сетка в области, где наблюдаются большие градиенты переменных. В целом же согласие расчета по коду GRIF и эксперимента следует признать удовлетворительным.

*О влиянии отдельных параметров на переходной процесс в верхней камере.*

Чтобы глубже понять характер протекающих в верхней камере реактора MONJU явлений и оценить, как может повлиять на точность расчета погрешность в определении исходных параметров, был выполнен ряд расчетов по коду GRIF, в которых варьировались отдельные параметры модели. Одна такая погрешность может быть связана с определением коэффициента гидравлического сопротивления отверстий в кольцевой обечайке. Данный коэффициент сопротивления хорошо известен, если поток направлен вдоль оси отверстия, однако в нашем случае набегающий поток заведомо движется под большим углом к оси, причем этот угол может меняться в ходе переходного процесса. Результаты параметрических расчетов представлены на рис. 12а в виде зависимости длительности «фазы стратификации» от коэффициента гидравлического сопротивления отверстий.

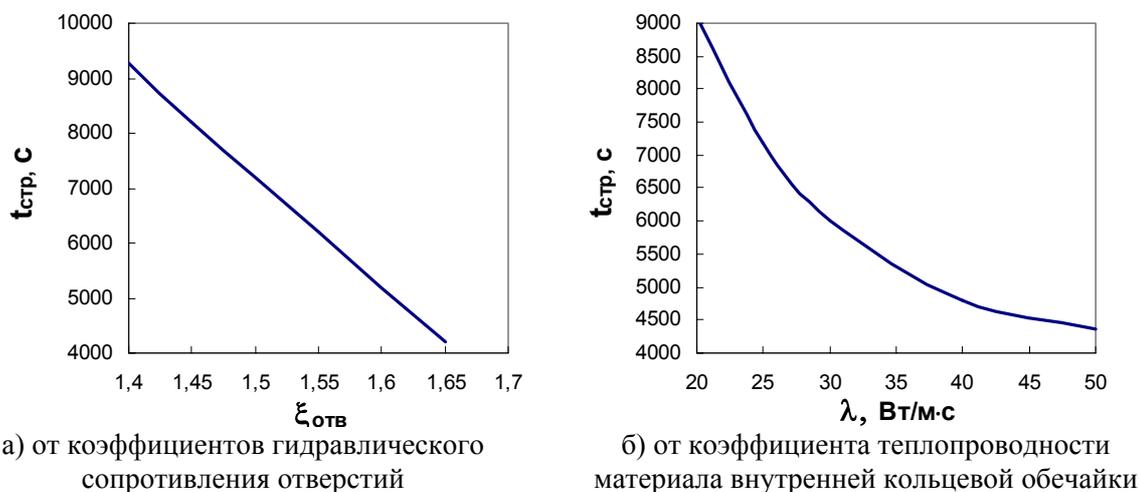


Рис. 12. Зависимость длительности «фазы стратификации» от коэффициентов

Видно, что длительность периода существования расслоенного режима в камере весьма чувствительна по отношению к величине гидравлического сопротивления отверстий. Так, увеличение последнего всего на 10% приводит к увеличению скорости движения температурного фронта вдоль высоты камеры почти в 2 раза. Еще одним существенным параметром, влияющим на длительность переходного процесса в камере, является теплопроводность внутренней обечайки (Рис. 12б). При увеличении теплопроводности увеличивается теплообмен между натрием, движущимся вниз в опускном кольцевом зазоре, и натрием, движущимся вверх в объеме камеры. Это приводит к выравниванию температуры и в итоге, к снижению напора естественной циркуляции, препятствующему движению натрия по тракту, проходящему через зазор над верхней кромкой внутренней обечайки. В результате температурный фронт движется быстрее и длительность «фазы стратификации» сокращается.

### Выводы

На основе выполненного расчетного анализа эксперимента на реакторе MONJU можно сделать вывод о том, что код GRIF позволяет адекватно описывать нестационарные трехмерные течения в верхней камере быстрого реактора при совместном действии естественной и вынужденной конвекции, что подтверждается согласием расчетных и экспериментальных значений температур в подавляющем большинстве точек измерения на протяжении всего переходного процесса.

Параметрический анализ течения и теплообмена в верхней камере реактора MONJU показал, что:

- в исходном стационарном состоянии в определенном диапазоне значений

общего расхода через реактор задача становится неоднозначной и может иметь два разных решения, отвечающих двум разным картинам течения. Реализация того или иного решения зависит от предыстории (начального приближения);

– переходной процесс оказался довольно чувствительным к следующим двум параметрам: гидравлическому сопротивлению отверстий во внутренней кольцевой обечайке камеры и величине теплопроводности материала обечайки. Поэтому относительно малые погрешности в определении этих параметров могут привести к значительным ошибкам в решении.

## Список литературы

- 1 GRIF and HYDRON – 3D Codes for Analysis of Thermal and Hydraulics Parameters or Reactors with 1-Phase Incompressible coolant/ Shvetsov Yu.E., Volkov A.V./ Report 10-th International Meeting of IAHR Working Group on Advanced Nuclear Reactors Thermal Hydraulics.- Obninsk, Russia, 2001, July 17-19.
- 2 Analytical studies on thermal-hydraulic parameters of fast reactor taking into account effect of inter-wrapper space/ Kuznetsov I.A., Shvetsov Yu.E./ Report International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities.- Kyoto, Japan, 2009, December 7-11.
- 3 Леончук М.П., Швецов Ю.Е., Швецова Л.В.. Расчет пространственного теплообмена в (r-φ-z)-геометрии: препринт № 1977.- Обнинск: ФЭИ, 1989.
- 4 Bengue J.P., Coeffe Y., Herledan R./ Report on 7-th Int. Conf. On Numerical Methods in Fluid Dynamics.- Stanford Uni., USA, 1980, June 23-27.
- 5 Kobayashi J. et al./ Proc. 29-th Nat. Heat Transfer Symp. - Japan, 1992, Вып.153. С. 98,.
- 6 Specifications of Liquid Metal Boiling/ Working Group Benchmark Calculations.- Winfrith Technology Centre: Dorchester, 1989
- 7 . Thermohydraulic Investigations on the Transition from Forced Nominal to Natural Circulation DHR Operation Conditions in the Reactor Model Ramona/ Weinberg D., Kamide H., Marten K., Hoffman H./ Description of a Benchmark Problem - Karlsruhe, 1990
- 8 Thermohydraulic Investigations on the Transition from Forced Nominal to Natural Circulation DHR Operation Conditions in the Reactor Model Ramona/ D.Weinberg, H.Oshima, K.Marten, H.Hoffman/ Experimental rezalts of Case 1 and Case 2 - Karlsruhe, 1991
- 9 Fast reactor data base. IAEA-TECHDOC-866, 1996
- 10 Shinju Yoshikawa, Masaki Minami /Data description for second Research coordination Meeting (RCM) of IAEA Coordinated Research Project (CRP) on “Benchmark Analysis of Sodium Natural Convection in the Upper Plenum of the MONJU Reactor”.- JAEA, 2009.
- 11 MONJU plant trip test in December 1995/ Shinju Yoshikawa/ Consultants meeting on IAEA Coordinated Research Project: “Benchmark Analysis of Sodium Natural Convection in the Upper Plenum of the MONJU Reactor”.- JAEA, 2007.
- 12 Shinju Yoshikawa/ Data description for Numerical Analyses of Sodium Natural Convection in the Upper Plenum of the MONJU Reactor Vessel.- JAEA, 2007.