

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В БАКЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

С.Т. Лескин, В.И. Слободчук, А.С. Шелегов, С.В. Яуров, Е.А. Чистозвонова, А.П. Сорокин\*, А.Н. Опанасенко\*, С.Г. Калякин\*, Д.Г. Зарюгин\*  
ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск

\*ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Обсуждается численное моделирование неизоотермического течения теплоносителя в модели реактора на быстрых нейтронах. Моделирование проводилось с помощью кода ANSYS CFX, для чего была разработана 3D-модель экспериментальной установки. При моделировании сложных конструктивных элементов модели реактора (теплообменники, активная зона и т.д.) использовалась модель пористого тела. Приведены результаты расчетов теплогидравлических процессов для режима принудительной циркуляции. Результаты согласуются с экспериментальными данными, подтверждая возможность использования расчетных кодов для численного моделирования теплогидравлики баков быстрых реакторов.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, моделирование, экспериментальная модель, расчетный код, аварийное расхолаживание, модель пористого тела.

**Key words:** fast breeder reactor, modeling, experimental model, numerical code, emergency cooling, porous body model.

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с современными представлениями настоящее и особенно будущее ядерной энергетики во многом связано с развитием и расширяющейся эксплуатацией быстрых реакторов [1]. При проектировании быстрых реакторов важной составляющей проекта является обоснование теплогидравлических характеристик реакторов. Правильность выбора этих характеристик во многом определяет эксплуатационную надежность и безопасность ядерного реактора. В последнее время к решению данной задачи все более широко привлекаются так называемые теплогидравлические коды – компьютерные программы, позволяющие рассчитывать пространственные распределения основных теплогидравлических параметров (скорости и температуры теплоносителя, температуры элементов конструкции и т. д.) в реакторе и его отдельных элементах [2,3]. Поскольку экспериментальное обоснование не всегда возможно, многие конструктивные решения, в том числе и влияющие на безопасность, принимаются на основании результатов теоретических исследований, выполненных с использованием тепло-гидравлических кодов.

В ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского модернизирована установка САРХ (система аварийного расхолаживания) – интегральная трехконтурная водяная модель быстрого реактора, на которой проводятся экспериментальные исследования стратифицированных

© С.Т. Лескин, В.И. Слободчук, А.С. Шелегов, С.В. Яуров, Е.А. Чистозвонова,  
А.П. Сорокин, А.Н. Опанасенко, С.Г. Калякин, Д.Г. Зарюгин, 2013

процессов в элементах контура циркуляции быстрого реактора в различных режимах работы, включая аварийное расхолаживание [4]. В корпусе модернизированной модели расположены элементы, имитирующие основное оборудование быстрого реактора.

### **ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ**

В 1999 – 2001 гг. сотрудниками ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского был разработан стенд «Система аварийного расхолаживания» для китайского реактора CEFR. Стенд САРХ (рис. 1) – это уменьшенная модель этого реактора (примерно 1:5).

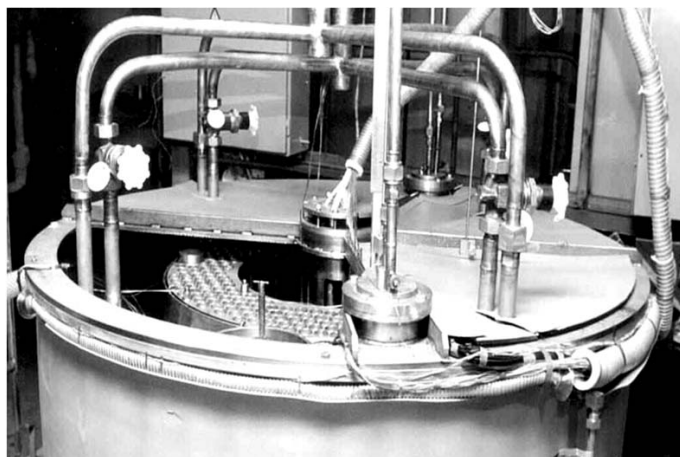


Рис. 1. Интегральная трехконтурная водяная модель САРХ

Современный водяной стенд САРХ предназначен для проведения исследований с целью расчетно-экспериментального обоснования выполнения функции теплоотвода системой аварийного расхолаживания применительно к реактору БН-1200. В его состав входят

- модель реактора, включающая в себя корпус с крышкой, напорную камеру с имитаторами сборок, колонну центральную, отражатель, выгородку элеваторов, внутрибачковую защиту, четыре модели промежуточных теплообменников (ПТО), две модели автономных теплообменников (АТО);

- опорный пояс, в составе которого верхняя и нижняя камеры, экраны горизонтальные и экраны корпуса, опоры модельных ПТО и имитаторы опор ГЦН-1, профилирующая обечайка, имитатор блока внутрибачковых ИК, всасывающий и напорный трубопроводы с обратными клапанами (элементами имитаторов ГЦН-1);

- постамент – металлоконструкции, площадки, трапы, обеспечивающие монтаж и эксплуатацию стенда;

- модель промежуточного контура системы аварийного расхолаживания, обеспечивающая требуемый теплосъем с модельных АТО и уровень температур на входе в АТО;

- обслуживающие системы стенда (водяная и газовая);

- система электроснабжения стенда с коммуникациями подвода электропитания к потребителям стенда;

- система управления стендом;

- комплекс технических средств, обеспечивающих автоматизированный сбор и обработку информации – средства измерения, система усилителей и потребителей сигналов от средств измерения, система регистрации и обработки получаемой информации.

Внешняя часть системы первого контура обеспечивает подачу теплоносителя на имитаторы ГЦН-1, в трассы охлаждения имитаторов опор ГЦН-1, в имитаторы внутрибачковых ионизационных камер (ИК) и в имитатор трассы охлаждения корпуса реактора (со-

вместно с имитаторами ГЦН-1 моделирует работу главных циркуляционных насосов первого контура натурального реактора). Модель второго контура обеспечивает требуемый теплоотвод от модельных ПТО.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ СТЕНДА САРХ

Численное моделирование неизотермического течения теплоносителя в баке САРХ проводилось с помощью расчетного кода ANSYS CFX, для чего была разработана компьютерная 3D-модель бака в масштабе 1:1. На рисунке 2 представлена трехмерная модель стенда САРХ (внутрикорпусные устройства), включающая в себя элементы стенда. Исключение составляют такие элементы, как активная зона, напорный коллектор, внутрибаковая защита, промежуточные теплообменники, аварийные теплообменники. Поскольку внутренняя геометрия этих элементов имеет довольно сложную структуру, то для моделирования их гидравлических свойств использовался формализм модели пористого тела.

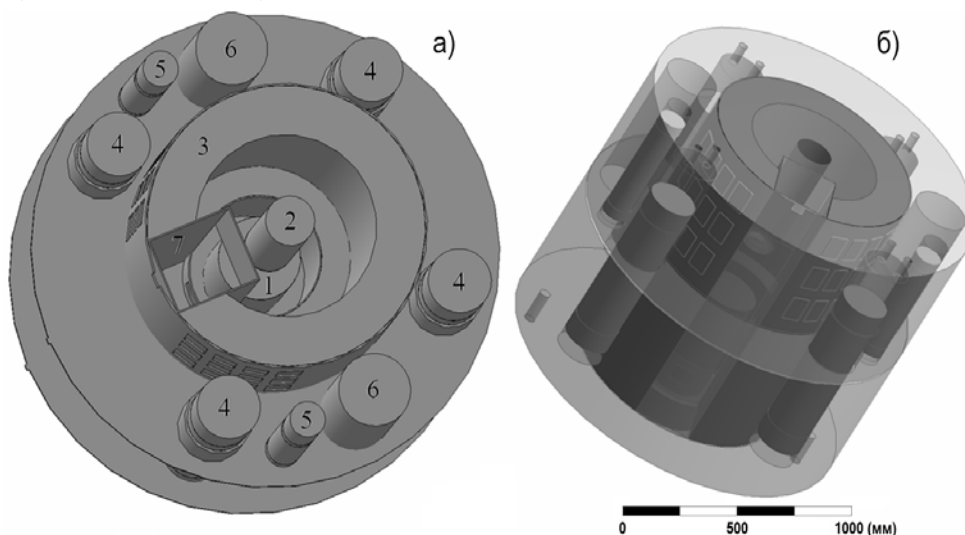


Рис. 2. Трехмерная модель внутрикорпусных устройств стенда САРХ: 1 – активная зона; 2 – центральная колонна; 3 – внутрибаковая защита; 4 – ПТО; 5 – АТО; 6 – имитатор ГЦН; 7 – элеватор выгрузки; б) трехмерная модель пористого тела

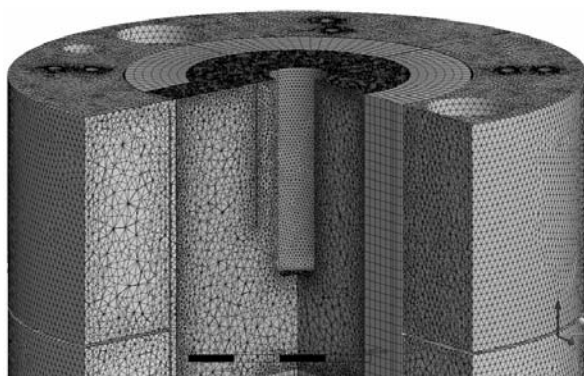


Рис. 3. Расчетная сетка (верх модели)

Расчетная сетка строилась встроенным генератором сеток (рис. 3). Расчетная сетка частично структурирована, но в целом неравномерная и включает в себя 4,5 млн. элементов.

Граничные условия задавались, согласно техническому заданию, по программе проведения экспериментов на водяном стенде САРХ [3]:

- температура в напорных патрубках ГЦН – 24,9 °С;
- суммарный расход на напорных патрубках имитаторов ГНЦ – 3,65 кг/с;
- давление во всасывающих патрубках имитаторов ГЦН – 1 атм.;
- суммарная мощность имитаторов ТВС – 100 кВт;
- тепловая мощность одного промежуточного теплообменника – 25 кВт.

Все оборудование первого контура размещено в открытом баке, поэтому в граничных условиях предусматривается задание открытой поверхности с температурой и давлением окружающей среды.

В работе моделировался режим принудительной циркуляции (стационарный режим работы реактора). При расчетах учитывалась зависимость основных теплофизических свойств воды – плотности, теплопроводности, теплоемкости и кинематической вязкости – от температуры [4]. Модель турбулентности, применяемая в расчете,  $k-\epsilon$ .

Основная цель численного моделирования – проведение верификационного расчета программного комплекса ANSYS CFX на имеющемся экспериментальном материале для уточнения замыкающих соотношений.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ФОРМЫ ЗАПИСИ ДЛЯ ЗАКОНОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

При расчете некоторые элементы конструкции были представлены в виде пористых тел (активная зона, внутрибаковая защита, напорный коллектор, промежуточные теплообменники, автономные теплообменники). Характеристики пористых тел, моделирующих свойства элементов стенда (рис. 4), были определены по результатам отдельных аналитических расчетов.

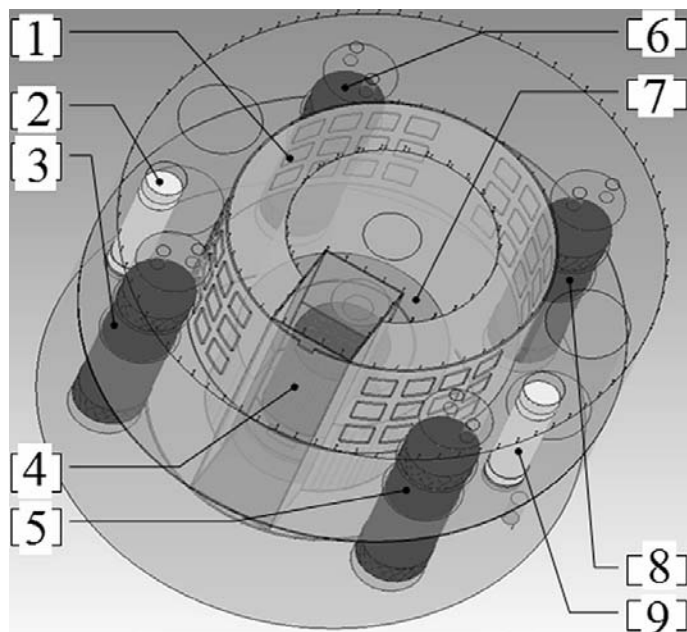


Рис. 4. Пористые тела: 1, 7 – элементы внутрибаковой защиты; 2, 9 – аварийные теплообменники (АТО); 3, 5, 6, 8 – промежуточные теплообменники (ПТО); 4 – имитаторы ТВС

Результаты этих расчетов позволили определить эквивалентные характеристики пористых тел, при которых следует ожидать наиболее точного описания картины течения в рассматриваемой области.

В ANSYS CFX законы сопротивления записываются в виде приведенного коэффициента сопротивления. Выражение для расчета потери давления на трение  $\Delta p$  имеет вид

$$\Delta p = CR \cdot U^2 \cdot \Delta l, \quad (1)$$

где  $CR$  – приведенный коэффициент сопротивления,  $\text{кг/м}^4$ ;  $U$  – скорость теплоносителя,  $\text{м/с}$ ;  $\Delta l$  – длина пути,  $\text{м}$ .

Для расчета потери давления на трение и на местные сопротивления используется соотношение [4, 5]:

$$\Delta p_s = \left( \xi_0 + \frac{\Delta l}{d_r} \right) \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\xi_0$  – коэффициент местного сопротивления;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трению;  $\varepsilon$  – степень пористости среды.

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  рассчитывался с использованием законов сопротивления для каждого пористого тела. Местные сопротивления во всех пористых телах определяются геометрией модели, поэтому потери давления на местных сопротивлениях рассчитываются кодом CFX.

Таким образом, имеется система уравнений, из которой несложно вывести выражение для определения приведенных коэффициентов сопротивления трения  $CR$  как для продольного, так и для поперечного течений:

$$\begin{aligned} \Delta p_s &= \lambda \frac{\Delta l \rho U^2}{d_r} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^2, \\ \frac{\Delta p}{\Delta l} &= CR \cdot U^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Приведенный коэффициент сопротивления

$$CR = \frac{\lambda \rho U^2}{d_r} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^2, \quad (4)$$

где степень пористости определяется отношением объемов жидкости и твердого тела, а именно:

$$\varepsilon = V_{\text{ж}} / V_{\text{т}}. \quad (5)$$

При расчете было принято, что во всех элементах конструкции режим течения турбулентный,  $4000 \leq Re \leq 10^5$ . Помимо этого считаем, что все поверхности модели гидравлически гладкие (шероховатость отсутствует), поскольку учет шероховатости поверхностей слабо влияет на результат расчета, т. е. на поле скоростей и температуры. Кроме этого, учет шероховатости поверхностей конструкции приводит к более подробному описанию расчетной области (увеличение количества сеточных элементов), что неминуемо увеличивает затраты машинного времени для решения поставленной задачи.

В итоге получаем выражение для оценки значения приведенного коэффициента сопротивления трения для областей с преимущественно продольным обтеканием:

$$CR_{\parallel} = \frac{0,3164}{2} \cdot \eta^{0,25} \cdot \rho^{0,75} \cdot U^{-0,25} \left[ d \cdot \left[ \frac{6}{\sqrt{3\pi}} \cdot \left( \frac{s}{d} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1,25} \cdot \left( \frac{V_{\text{ж}}}{V_{\text{т}}} \right)^{-2}. \quad (6)$$

Выражение для расчета коэффициента сопротивления трения при поперечном обтекании, имеет вид [5]

$$\lambda_{\perp} = \frac{C}{Re^{0,27}} \cdot (z + 1), \quad (7)$$

где  $z$  – количество рядов трубок.

При оценке значения приведенного коэффициента сопротивления трению для поперечного обтекания пучка стержней используется выражение

$$CR_{\perp} = \frac{C}{2} \cdot \varepsilon^{-2} \cdot d_r^{-1,27} \cdot \eta^{0,27} \cdot \rho^{0,73} \cdot U^{-0,27} \cdot (z+1), \quad (8)$$

где коэффициент  $C$  рассчитывался по рекомендациям [4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование проводилось для режима принудительной циркуляции теплоносителя с суммарной мощностью имитаторов ТВС 100 кВт (режим ПЦ 100). В результате расчетов были получены распределения скоростей и температуры теплоносителя при неизотермическом течении. Распределение температуры по сечению элеваторной выгородки (рис. 5), показывает наличие застойных зон в баке модели, в которых наблюдается минимально возможная температура воды, равная температуре входа. Температура на выходе из активной зоны по результатам расчетов составила 40,2 °С, что меньше температуры, обнаруженной в серии экспериментов режима ПЦ 100. В эксперименте термопары регистрировали локальную температуру в диапазоне 50 – 60 °С. Несмотря на то, что общий уровень температуры в расчете оказался несколько меньшим по сравнению с экспериментом, области минимальных и максимальных температур в целом совпадают. Этот факт свидетельствует о правильности подхода к решению задачи численного моделирования неизотермического течения теплоносителя. Возможная причина расхождения – недостаточно полная информация о местах расположения термопар, а также недостаточно точные значения характеристик пористых тел. Поэтому требуется корректировка приведенных коэффициентов сопротивления, что возможно

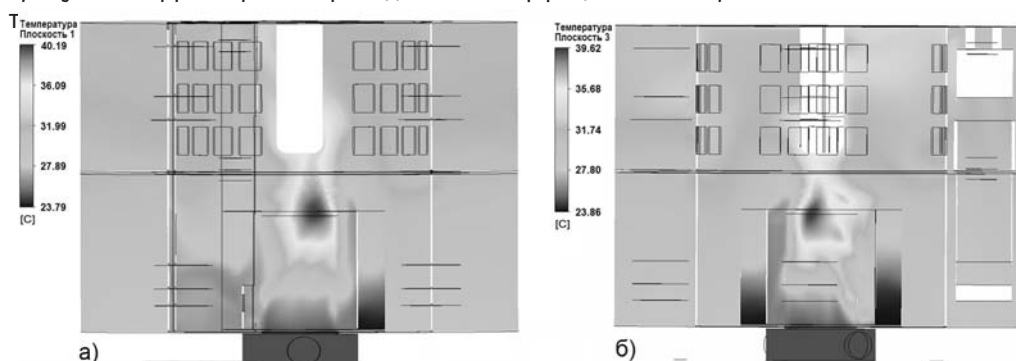


Рис. 5. Распределение температур: а) сечение по элеваторной выгородке; б) сечение по ПТО

Стоит отметить имеющуюся неравномерность температур по активной зоне в районе внутрибаковой защиты, а также в районе ПТО. Поток теплоносителя в баке модели, имеющей сложную конструкцию, является стратифицированным. Несмотря на то, что расчетная сетка является достаточно грубой (для описания стратифицированного течения необходимо большее количество элементов и детализация сетки), обнаружены области с большими градиентами температур примерно 8–12 °С/Δ, где Δ – характерный размер элемента расчетной сетки (не более 5 мм). Такая область выявлена как в экспериментах, так и в расчетах в верхней камере бака реактора вблизи центральной колонны. Большая стратификация теплоносителя влияет на ресурс корпуса реактора и внутрикорпусные устройства, а также на безопасность.

Следует отметить и сложную структуру течения теплоносителя с образованием многочисленных вихрей, полученную в расчетах. На рисунке 6 представлены линии тока по сечению ПТО и элеваторной выгородке. Можно отметить наличие локальных вихрей в верхней и нижней камерах, а также устойчивое опускное течение теплоносителя в ПТО

за счет принудительной циркуляции и разности плотностей теплоносителя.

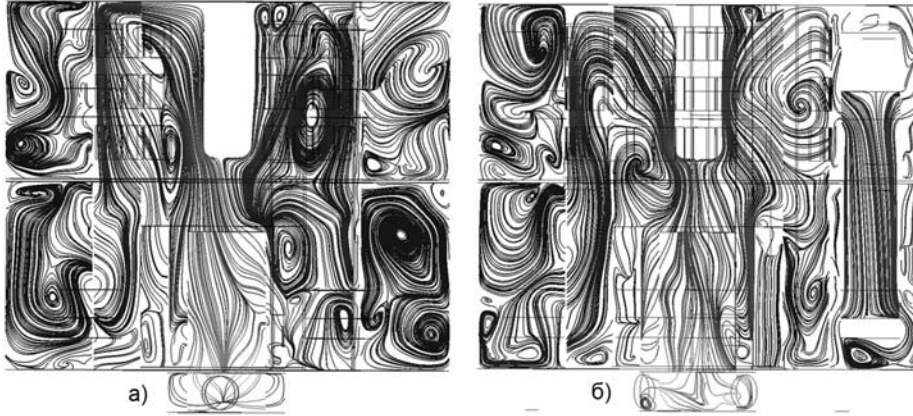


Рис. 6. Структура течения воды в баке: а) линии тока (сечение по элеваторной выгородке); б) линии тока (сечение по ПТО)

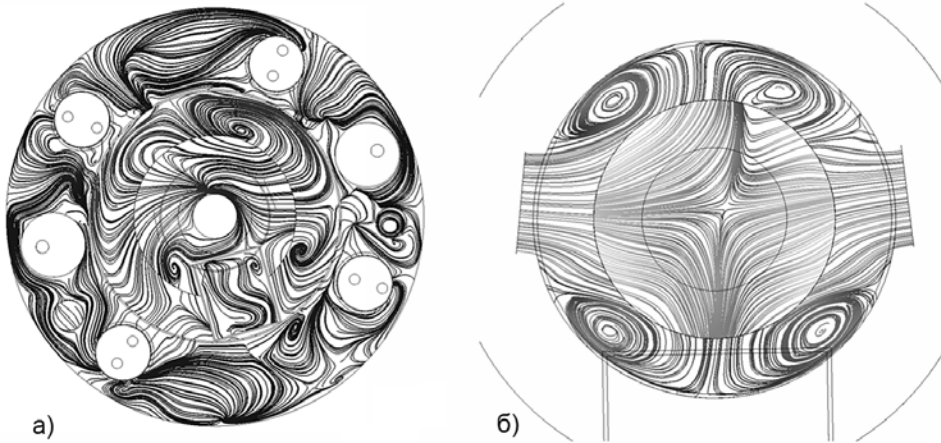


Рис. 7. Структура течения: а) в поперечном сечении на входе в ПТО по первому контуру; б) по напорному коллектору

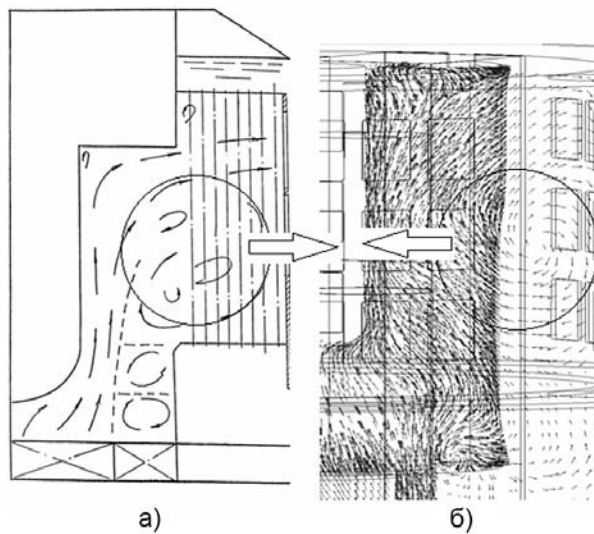


Рис. 8. Структура движения теплоносителя в верхней камере (сравнение расчета и эксперимента): а) эксперимент; б) расчет в CFX

Существует не только продольное течение теплоносителя в реакторе, но и поперечное, что подтверждает сложный характер течения теплоносителя в баке реактора (рис. 7).

Необходимо упомянуть о течении теплоносителя в напорном коллекторе модели, имеющее сложный характер, в результате чего происходит перераспределение расходов по имитаторам ТВС (рис. 7б). Коллекторный эффект обусловлен наличием двух входных патрубков и их расположением.

Течение теплоносителя в баке реактора качественно согласуется с данными эксперимента. Наблюдаются вихревые течения в районе выходных окон трубной защиты на входе в ПТО, а также в районе выхода из боковых экранов активной зоны. Сравнение результатов расчета и экспериментов, проведенных на секторной прозрачной модели, представлено на рис. 8.

## ВЫВОДЫ

Разработана 3D-модель стенда САРХ, позволяющая с помощью расчетного кода CFX моделировать теплогидравлические процессы, происходящие в баке модели реактора.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало, что подход, применяемый к расчету неизоэнтальпического течения теплоносителя с использованием модели пористого тела, оправдан. Применение модели пористого тела позволяет сократить время расчета и использовать мелкую расчетную сетку в области основного протока для более детального описания структуры потока теплоносителя в баке. Необходимо проведение комплексных экспериментально-расчетных исследований, чтобы использовать первичные опытные данные для составления матрицы верификации по исследованию неизоэнтальпического стратифицированного течения теплоносителя в баках быстрых реакторов. Проведение верификационных расчетов даст возможность скорректировать и уточнить наиболее подходящие для этой цели модели турбулентности и коэффициенты в других замыкающих соотношениях. Полностью скорректированная расчетная модель позволит проводить расчетное обоснование проектов быстрых реакторов, таких как БН-1200 и СВБР.

## Литература

1. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200// Атомная энергия. –2010. –Т. 108. –№4. –С.201-205.
2. Чигарев А.В., Кравчук, А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 2004.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: КомпьютерПресс 2002.
4. Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Зарюгин Д.Г. Стратификация теплоносителя в ядерных энергетических установках. / Тезисы докладов научно-технической конференции «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2011)». Обнинск. ГНЦ РФ-ФЭИ. -2011.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоиздат, 1984.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975.

Поступила в редакцию 28.05.2013



**УДК 621.039.052**

*Numerical simulation of the coolant flow in the porous body model of a fast breeder reactor \ Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S., Yaurov S.V., Chistozvonova E.A., Sorokin A.P., Opanasenko A.N., Kalyakin S.G., Zaryugin D.G.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 8 pages, 8 illustrations. – References, 5 titles.*

The results of numerical simulation of the coolant flow in the model of a fast breeder reactor are presented. 3D-model of an experimental facility is developed and the simulation is carried out with ANSYS CFD code. The porous body approach is used for simulation of complicated elements of the reactor model such as heat exchangers, reactor core. The numerical results of thermohydraulic characteristics for the case of the coolant forced circulation as well as for the case of emergency cooling are presented. The numerical results are in qualitative agreement with the experimental data. The performance capability of a passive emergency cooling system with self-contained heat exchangers is confirmed.

**УДК 53.072.8**

*Conception design of intensive nonreactor neutron source based on hydrogen ion accelerator \ Kononov O.E., Kononov V.N., Bokhovko M.V., Gremiachkin D.E.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 9 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.*

Creation of intensive neutron source for various types of neutron therapy is discussed. The way to generate intensive neutron beams and they ability is described. Shown that accelerator with 3 MeV beam energy it is possible to create neutron facility for oncology clinic.

**УДК 621.039.526.034+621.039.546.8:536.24**

*Experimental analysis of flowrates distribution features in double-loop reactor channels \ Avdeev E.F., Chusov I.A.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 7 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.*

Experimental data on the flowrate distribution in working channels dummies of «Research reactor model» experimental facility with double-loop configuration are provided. The procedures of experiments performance and received experimental data processing are provided in detail. Based on the fulfilled experiments, the conclusion was made on applicability of the obtained data for the reactor plant safety analysis.

**УДК 532.5**

*The equations and algorithms for the calculation of temperature fields of shells of revolution in aerodynamic flow considering dependence of its material properties on the temperature \ Rozman L.S.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.*

Due to the rapid development of space exploration programs using rockets with nuclear facilities there was a necessity to quickly and efficiently calculate temperature fields of head part of missile to ensure safe transport of nuclear installations to orbit. We consider the formulation and solving algorithms of the non-stationary problem for calculation of temperature fields of shell of revolution in high-temperature aerodynamic flow with known temperature. We propose and consider the physical model and calculation of temperature fields in the frontal part and in circle sections of the shell of revolution. The proposed physical model of shell heat transfer with the ablation of material will predict the ability to perform the targeting of the shell by calculating the temperature fields and the total thickness of entrained layers for different possible values of the parameters defining the ablation parameters for shell material.

**УДК 621.039.516**

*The comparison analyses of VVER REMIX-fuel characteristics when multiple recycling were made \ Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Kalashnikov A.G., Kapranova E.N., Korobitsyn V.E., Puzakov A.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica»*