

10. **Marquardt D.** An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. — Appl. Math., 1963, v. 11, p. 431—441.
11. **Narendra P.** A separable median filter for image noise smoothing. — IEEE Transact. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1981, v. PAMI-3, № 1, p. 20—29.
12. **Arce G.** Nonlinear Signal Processing: a Statistical Approach. New Jersey: Wiley, 2005.
13. **Huang T., Yang G., Tang G.** A fast two-dimensional median filtering algorithm. — IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1979, v. 27, № 1, p. 13—18.
14. **Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. и др.** Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М): Препринт ОИЯИ Р13-2012-42, 2012.
15. **Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. и др.** Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2: Сообщение ОИЯИ Р13-2012-41, 2012.
16. **Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц.** Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности: Сообщение ОИЯИ Р13-2014-61, 2014.

Поступила в Редакцию 26.04.16

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ CFD-КОДА CONV-3D В РЕАКТОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Макаревич А.А., Первичко В.А., Ромеро Рейес И.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

В настоящее время ведется разработка быстрого реактора четвертого поколения БН-1200. Технические решения, заложенные в его проект, направлены на повышение безопасности и увеличение срока службы. Увеличение срока службы и повышение безопасности проектируемой реакторной установки не могут быть достигнуты без достоверной информации о теплогидравлических характеристиках теплоносителя в элементах контура циркуляции реактора. В последние годы для обоснования теплогидравлических характеристик все чаще используются методы вычислительной гидродинамики (CFD-коды), основанные на современных компьютерных технологиях.

CFD-коды представляют собой трехмерные тепло- и гидродинамические коды, отвечающие последним достижениям в области вычислительных методов и компьютерной техники. Их начали применять в промышленности в 1970-е годы. Особая актуальность их применения в ядерной энергетике появилась с внедрением суперкомпьютеров.

Одним из практических примеров использования CFD-программ в атомной отрасли может быть моделирование температурной стратификации теплоносителя. Опыт эксплуатации БН-600, экспериментальные исследования и численное моделирование БН-800 показали, что в верхней камере реактора и на входе в теплообменники наблюдается температурное расслоение теплоносителя (стратификация) [1]. Эта проблема актуальна и для реакторов четвертого поколения. Температурная стратификация теплоносителя приводит к формированию застой-

ных и рециркуляционных зон с большими градиентами и пульсациями температуры на границах раздела изотермических зон, которые вызывают дополнительные термоциклические нагрузки на оборудование и могут оказывать существенное влияние на ресурс несущих конструкций.

Целями численного моделирования являются исследование особенностей теплогидравлики стратифицированного потока в элементах контура циркуляции быстрого реактора в различных режимах эксплуатации, разработка рекомендаций по уменьшению температурной неоднородности, а также подтверждение принятых проектных решений об эффективности пассивной системы аварийного отвода тепла с погружными теплообменниками в верхней камере реактора. Эти задачи требуют значительного увеличения вычислительных затрат по сравнению с традиционным использованием CFD-кодов и применения суперкомпьютеров.

В ИБРАЭ имеется опыт разработки численных методов решения динамики как несжимаемой, так и слабосжимаемой жидкости [2—4]. Основу вычислительной методики составляют алгоритмы с малой схемной диффузией, для которых дискретные аппроксимации строятся с использованием конечно-разностных методов и полностью разнесенных сеток. Методика реализована в трехмерном вычислительном тепло- и гидродинамическом коде CONV-3D, предназначенном для вычисления как на персональных, так и кластерных ЭВМ, и верифицирована на тестах в широком диапазоне чисел Релея 10^6 — 10^{16} и Рейнольдса 10^3 — 10^5 [5—7].

В настоящей статье приведены результаты тестирования разработанной методики на максимально приближенных к реальным процессам задачах: естественная и вынужденная конвекция натрия в верхней камере реактора АЭС «Мондзю» (Япония), смешение двух потоков при разной температуре во вторичном контуре установки «Феникс» (Франция). Перечислены особенности методики расчета тепло- и гидродинамических характеристик оборудования АЭС.

Вычислительная методика. Тепло- и гидродинамические процессы в несжимаемых средах моделируются с помощью нестационарных уравнений Навье—Стокса в естественных переменных вместе с уравнением энергии

$$\begin{aligned}\frac{d\rho u}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\sigma_{xx} + \frac{\partial}{\partial y}\sigma_{xy} + \frac{\partial}{\partial z}\sigma_{xz} + \rho g_x; \\ \frac{d\rho v}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\sigma_{yx} + \frac{\partial}{\partial y}\sigma_{yy} + \frac{\partial}{\partial z}\sigma_{yz} + \rho g_y; \\ \frac{d\rho w}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\sigma_{zx} + \frac{\partial}{\partial y}\sigma_{zy} + \frac{\partial}{\partial z}\sigma_{zz} + \rho g_z; \\ \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0;\end{aligned}\quad (1)$$

$$\frac{d(\rho H)}{dt} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} H) = \operatorname{div}(\kappa \operatorname{grad} T),$$

где ρ — плотность; u — первый компонент вектора скорости; p — давление; $\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$,

$$\sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \sigma_{zx} = \sigma_{xz},$$

$$\sigma_{zy} = \sigma_{yz}, \quad \sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{— компоненты симметричного тензора вязких напряжений; } g_x \text{ — первый компонент вектора силы тяжести; } t \text{ — время; } v \text{ — второй компонент вектора скорости;}$$

$\sigma_{yx} = \sigma_{xy}$, $\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$, $\sigma_{yz} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$ — компоненты симметричного тензора вязких напряжений; g_y — второй компонент вектора силы тяжести; w — третий компонент вектора скорости; g_z — третий компонент вектора силы тяжести; $\mathbf{v} = (u, v, w)$ — вектор скорости;

$\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$, $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$, $\sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$ — компоненты симметричного тензора вязких напряжений; g_y — второй компонент вектора силы тяжести; w — третий компонент вектора скорости; g_z — третий компонент вектора силы тяжести; $\mathbf{v} = (u, v, w)$ — вектор скорости;

$H = \int_{T_0}^T c(\xi) d\xi$ — энтальпия; κ — теплопроводность; T — температура; T_0 — начальная температура; c — удельная теплоемкость; μ — коэффициент динамической вязкости.

Перечислим особенности развитого [8—10] для решения уравнений (1) численного алгоритма.

Численная реализация схем расщепления для уравнений Навье—Стокса выполнена в операторно-разностной постановке как двухшаговая процедура с корректировкой давления. Для получения интегрированной по времени схемы для уравнения энергии операторы уравнения расщепляются на две части, связанные с энтальпией и температурой, что приводит к двухходовой процедуре. В уравнении движения операторы также расщепляются на две части. Первая часть связана с переносом скорости за счет конвекции/диффузии, вторая — с градиентом давления.

При расчете динамики несжимаемой жидкости основной трудностью является вычисление давления (уравнения Пуассона с дивергентной правой частью), поскольку оно является крайне ресурсоемким. Для решения уравнения давления разрабатываются новые методы, которые позволяют получать численные результаты с помощью стандартных процедур на системах с распределенной памятью, например, [4, 10].

В вычислительной математике применяются два варианта метода фиктивных областей с продолжением коэффициентов по низшей и высшей производной. В предлагаемой методике используется первый вариант, который в физическом смысле может рассматриваться как включение в уравнения импульса модели пористой среды [8].

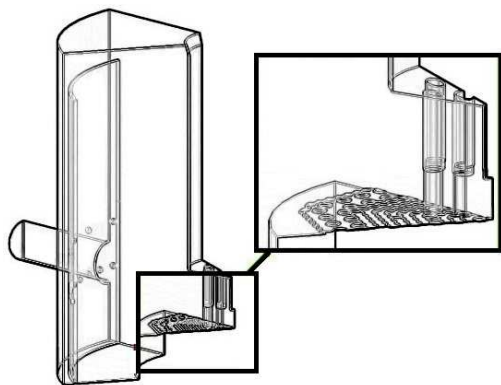
Для решения уравнения адвекции разработана регуляризованная нелинейная монотонная операторная схема расщепления со специальной аппроксимацией конвективных слагаемых для получения дискретного конвективного оператора, который является кососимметричным и не вносит вклад в кинетическую энергию, т.е. является энергетически нейтральным [9]. Такая схема обеспечивает второй порядок точности по пространству и первый по времени. Алгоритм устойчив при большом шаге интегрирования по времени [8]. Приведем результаты численного моделирования экспериментов, проводимых на реакторной установке «Мондзю», экспериментальной установке «Феникс».

Моделирование реактора АЭС «Мондзю». Эта реакторная установка петлевого типа

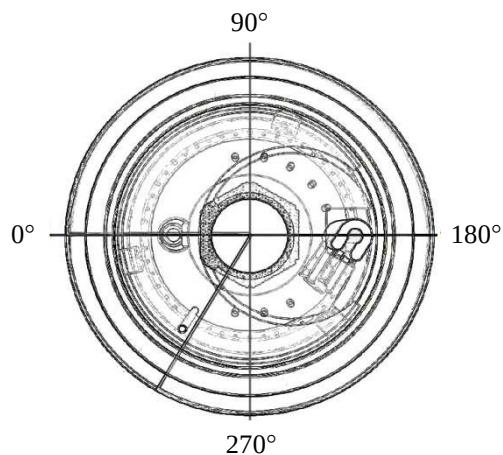
с быстрым реактором с натриевым теплоносителем. Геометрия верхней камеры реактора имеет сложную конструкцию. Системы трубок, расположенных над выходом из активной зоны, создают сложное течение в области под колонной СУЗ. Размеры трубок существенно меньше размера камеры. Однако их влияние на течение должно быть учтено для моделирования физических процессов в верхней камере реактора.

В 1995 г. проводили испытания по аварийному останову реактора при работе на мощности 40%. Переход реактора в режим аварийного расхолаживания моделировали подачей сигнала аварийной защиты «отказ главного конденсатора» и отключением турбины. Экспериментально исследовали нестационарное течение теплоносителя в камере в режиме расхолаживания. Начальная точка соответствует режиму работы реактора на уровне 40% мощности. Для исследования естественной конвекции натрия в верхней камере в качестве расчетной области выбран сектор 60° (рис. 1) [11]. Геометрическая модель [11] проточной части сектора верхней камеры представлена в виде твердотельной модели и показана на рис. 2. Расположение выходного канала в модели соответствует 0° на рис. 1. Выходные отверстия ТВС представлены шестиугольными. В силу сложности конструкции все элементы в надзонной области явным образом не учитываются.

В качестве входных граничных условий на торцах всех ТВС задаются расход и температура. На выходе модели задается условие нулевого возмущения статического давления. На отсекающих сектор плоскостях, а также на верхней границе расчетной области, моделирующей поверхность раздела натрий—аргон, определено



Р и с. 1. Модель камеры реактора АЭС «Мондзю» (Япония) с выделенным сектором 60° (вид сверху)

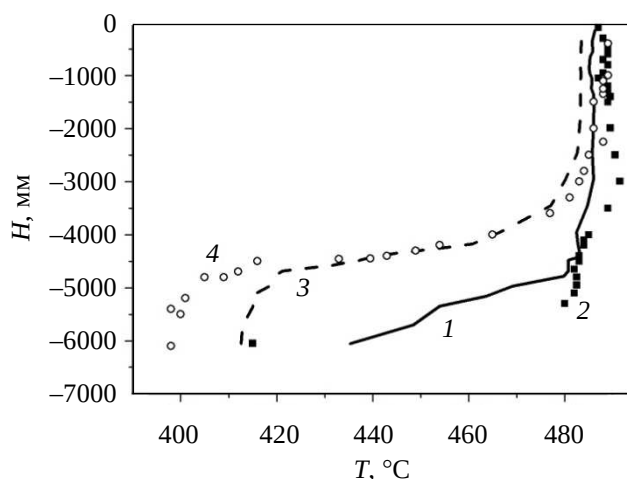


Р и с. 2. Геометрическая вычислительная модель проточной части сектора верхней камеры реактора АЭС «Мондзю»

условие стенки с проскальзыванием. На всех стенках конструкции задано условие непротекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательного компонента скорости.

Численное моделирование выполняли для двух режимов работы: стационарного на мощности 40% и расхолаживания. Для стационарного режима в эксперименте определяли температуру по высоте камеры в месте расположения термозонда и скорость и температуру в вертикальной плоскости сечения (по высоте камеры), расположенной под углом 45° относительно выходного патрубка. В режиме расхолаживания в эксперименте определяли изменение со временем температуры натрия в точках расположения термопар термозонда, скорость и температуру в вертикальной плоскости сечения (по высоте камеры), расположенной под углом 45° относительно выходного патрубка в разное время, и температуру по высоте камеры реактора в месте расположения термозонда в разное время. Расчеты выполнены с помощью кода CONV-3D с использованием квазипрямого численного моделирования (квазиDNS-подход) и расчетной сетки размером $321 \times 257 \times 513$ (число элементов ~ 42 млн), которая была построена с помощью программы трехмерного моделирования Geometry Editor [8].

На рис. 3 показана экспериментальная и рассчитанная с помощью кода CONV-3D температура по высоте камеры реактора АЭС «Мондзю» в месте расположения термозонда для стационарного режима и режима расхолаживания на момент времени 120 с. В обоих случаях по-



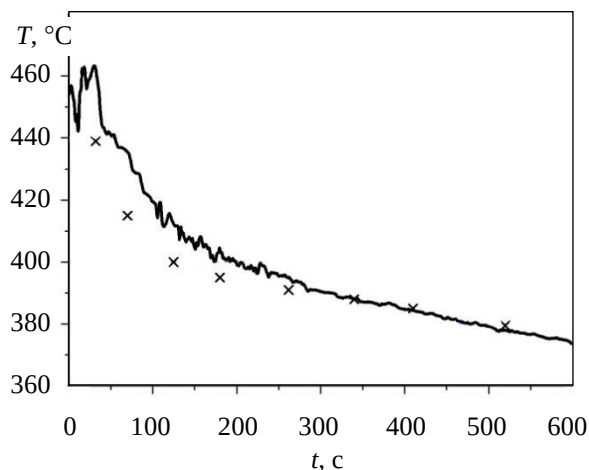
Р и с. 3. Рассчитанная с помощью кода CONV-3D (1) и экспериментальная (2) температура по высоте камеры реактора АЭС «Мондзю» в стационарном режиме и в режиме расхолаживания на момент времени 120 с (3) и (4) соответственно

лучено удовлетворительное совпадение численных и экспериментальных результатов. Для стационарного режима наблюдается занижение распределения температуры на интервале от -5000 до -6000 мм, что может быть вызвано моделированием в $1/6$ части геометрии. Но даже в этом случае расхождение не превышает 10 градусов, что составляет $\sim 10\%$ и находится в пределах ошибки. Среднее абсолютное отклонение температуры Δ_T составляет $5,6$ °C, среднее относительное δ_T — $2,7\%$. Отклонения рассчитывали по формулам

$$\Delta_T = |T_{\text{эксп}} - T_{\text{CFD}}|; \quad \delta_T = \frac{|T_{\text{эксп}} - T_{\text{CFD}}|}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \cdot 100\%,$$

где $T_{\text{эксп}}$, T_{CFD} — экспериментальная и расчетная температура в выбранной по высоте точке соответственно; T_{max} , T_{min} — максимальная и минимальная температура в эксперименте соответственно. Для режима расхолаживания результаты также удовлетворительные, при этом рассчитанное с помощью кода CONV-3D среднеквадратичное отклонение составляет $7,1$ °C ($\sim 3,4\%$).

На рис. 4 показано изменение со временем температуры натрия в точках расположения термопар термозонда, а именно для термопары ТЕ-3 [11], полученное для режима расхолаживания в эксперименте и расчете с помощью кода CONV-3D. Характер изменения температуры в обоих случаях схож. Таким образом, результаты удовлетворительные для обоих режимов. Сред-



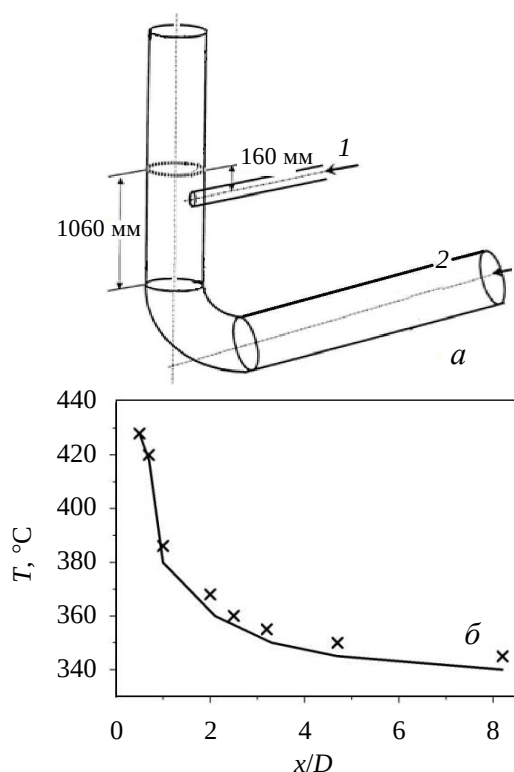
Р и с. 4. Рассчитанная с помощью кода CONV-3D (—) и экспериментальная (×) температура в точке расположения датчика ТЕ-3 в режиме расхолаживания

неквадратичное отклонение средней температуры в сравнении с показаниями термопар в эксперименте для верхней камеры смешения не превышает 9% .

Моделирование эксперимента «Феникс» с натриевым теплоносителем. Данный эксперимент предназначен для исследования смешения двух потоков при разной температуре во вторичном контуре. При нормальной работе натрия при низкой температуре поступает в основную трубу второго контура. Малая труба через Т-соединение с главной трубой переносит натрий в главную трубу при температуре выше, чем в основной трубе [11]. Совпадение расчетной и экспериментальной температуры удовлетворительное (рис. 5).

Закключение. Таким образом, разработанная методика прямого численного моделирования тепло- и гидродинамических процессов в несжимаемых средах с помощью нестационарных уравнений Навье—Стокса в естественных переменных вместе с уравнением энергии позволяет моделировать турбулентное течение в конструктивных элементах АЭС в широком диапазоне параметров $Ra < 10^{16}$ и $Re = 10^3$ — 10^5 . Об этом свидетельствуют результаты качественного и количественного совпадения с экспериментом.

Моделирование естественной и вынужденной конвекции натрия в верхней камере реактора АЭС «Мондзю» (Япония) и эксперимента «Феникс» (Франция) свидетельствует о хороших перспективах прямого численного моделирования турбулентных течений с помощью развитой методики для реакторных приложений.



Р и с. 5. Геометрия экспериментальной установки «Феникс» (а), рассчитанная с помощью кода CONV-3D температура на удалении от тройника (—) и экспериментальная (×) (б): 1 — малая труба, температура теплоносителя 430 °С, расход 7 кг/с, $d = 68$ мм; 2 — большая труба, температура теплоносителя 340 °С, расход 800 кг/с, $d = 494$ мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф. и др. Опыт применения и проблемы верификации CFD-кодов в проектах реакторов БН. Тезисы докл. научно-технического семинара «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике». Н. Новгород, 2012, с. 62.
- Chudanov V.V., Churbanov A.G., Vabishchevich P.N., Strizhov V.F. A numerical study on natural convection of a heat-generating fluid in rectangular enclosures. — Intern. J. Heat Mass Transfer, 1994, № 37(18), p. 2969—2984.
- Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Методы прямого численного моделирования турбулентности с использованием DNS и LES подходов в задачах тепло-гидравлики ТВС. — Изв. РАН, Энергетика, 2007, № 6, с. 47—57.
- Чуданов В.В., Горейнов С.А., Аксенова А.Е. и др. Новый метод решения CFD-задач на кластерных ЭВМ петафлопсной производительности. — Программные системы: теория и приложения, 2014, № 1(19), с. 3—14.
- Mahaffy J. Synthesis of results for the T-junction benchmark. — In: Proc. CFD4NRS-3 Conf. on Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Applications. USA, September, 2010, p. 1—32.
- Betts P., Bokhari I. Experiments on turbulent natural convection in an enclosed tall cavity. — Intern. J. Heat Fluid Flow, 2000, v. 21, p. 675—683.
- Smith B., Song C.-H., Chang S.-K. e.a. Report of the OECD/NEA KAERI Rod Bundle CFD Benchmark Exercise № NEA/CSNI/R(2013)5, 2013. 124 p.
- Методы вычислительной гидродинамики для анализа безопасности объектов ТЭК. Под общей ред. Л.А. Большова. Труды ИБРАЭ РАН. Вып. 3. М.: Наука, 2008. 210 с.
- Чуданов В.В., Вабищевич П.Н., Самарский А.А. и др. Нелинейные регуляризованные разностные схемы для многомерного уравнения переноса. — Журн. вычислительной мат. и мат. физики, 2001, т. 40, № 6, с. 900—907.
- Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А., Макаревич А.А. Математическое моделирование динамики жидкости в элементах ядерных энергетических установок с использованием суперЭВМ. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 6, с. 307—311.
- Benchmark Analyses of Sodium Natural Convection in the Upper Plenum of the Monju Reactor Vessel. Final Report of a Coordinated Research Project 2008—2012, IAEA-TECDOC-1754.

Поступила в Редакцию 12.11.2015

УДК 621.039.534

ОСОБЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Безносов А.В., Боков П.А., Бокова Т.А., Махов К.А. (НГТУ, г. Нижний Новгород)

Эксплуатация стальных элементов конструкций внутриреакторного оборудования быстрых реакторов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (свинец, эвтектика свинец—висмут) обеспечивается при формировании и поддержании на поверхности стали защитного покрытия [1, 2]. Нарушение его целостности приводит к коррозионно-эрозионному

износу поверхностного слоя, которое сопровождается селективным вымыванием компонентов конструкционных материалов потоком высокотемпературного теплоносителя. Процесс селективного вымывания является пороговым. Первоначально в теплоноситель переходят компоненты с меньшей энергией связи: никель и железо, затем в него поступают другие компо-