

DOI: 10.7242/1999-6691/2013.6.4.47

УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ РАЗНОТЕМПЕРАТУРНЫХ СТРУЙ МЕТОДОМ САВАРЕТ

А.М. Зайцев¹, В.Н. Семенов¹, Ю.Е. Швецов²¹Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия²Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия

Представлены результаты математического моделирования эксперимента по смешению разнотемпературных струй на выходе из топливных сборок реактора на быстрых нейтронах (БН) с жидким натриевым теплоносителем. Использовалась численная методика Кабаре, и основная задача заключалась в проверке ее применимости к расчетам течений жидкостей, обладающих малым числом Прандтля ($\sim 0,01$), в области относительно высоких чисел Рейнольдса ($\sim 10^5$). Именно такие жидкости служат теплоносителями в перспективных реакторах БН, чем и мотивировано проведение этой работы. Рассматривалось течение жидкости в проточной части экспериментального стенда, имеющей геометрически сложную конфигурацию. Описана методология построения адекватной расчетной области и конечно-разностной сетки. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показало, что предложенное решение задачи позволяет достаточно точно предсказывать значения усредненных по времени локальных температур в неизотермическом жидкометаллическом потоке и качественно правильно описывает пульсационные характеристики исследуемого течения.

Ключевые слова: LES, разбиение на подпроцессы, пульсационные характеристики, методика Кабаре, реактор с жидкометаллическим теплоносителем, смешение разнотемпературных струй

SIMULATION OF MIXING DIFFERENT TEMPERATURE JETS USING CABARET METHOD

A.M. Zaitsev¹, V.N. Semenov¹ and Yu.E. Shvetsov²¹Nuclear Safety Institute RAS, Moscow, Russia²Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Russia

Mathematical modeling of mixing jets with different temperatures discharged from the fuel assemblies of a sodium-cooled fast-neutron reactor BN is presented. Numerical simulations are performed using the CABARET method. The aim is to verify the applicability of the CABARET method to the calculations of liquid flows with a small Prandtl number (~ 0.01) at relatively high Reynolds numbers ($\sim 10^5$). For this purpose, the fluid flowing through the geometrically complex channel of the experimental setup has been investigated. Mesh decomposition and finite-difference grid generation techniques are described. The comparison between the numerical and experimental data shows that with the proposed approach the time-averaged local temperatures in the non-isothermal flow of liquid metal can be predicted with a sufficient accuracy, and a good qualitative description of the pulsation characteristics of the flow can be provided.

Key words: LES, mesh decomposition, pulsation characteristics of the flow, CABARET technique, liquid metal cooled reactor, mixing jets of with different temperatures

1. Введение

Процесс смешения разнонагретых струй имеет место над активной зоной ядерного реактора типа БН с натриевым теплоносителем, где сходятся и перемешиваются выходящие из смежных тепловыделяющих сборок (ТВС) струи теплоносителя. В случае частичных блокировок сечений ТВС, деформаций решеток топливных стержней и других дефектов могут возникать локальные перегревы теплоносителя на выходе из ТВС и, следовательно, температурные неоднородности потока. Поведение температурного «следа», возникающего при смешивании разнонагретых струй, представляет большой интерес с точки зрения температурного контроля теплоносителя над активной зоной. Измерение распределения и флуктуаций температуры натрия в зоне смешивания может быть использовано для обнаружения имеющихся и появляющихся дефектов в ТВС, возможного местоположения этих дефектов и степени перегрева натрия в них.

Задача исследования смешения нескольких турбулентных струй актуальна для многих технических приложений. Для жидкометаллического теплоносителя и трех соосных струй задача рассматривалась в работе [1]. Отличием задачи в предлагаемой вниманию статье является близость к реальной геометрии активной зоны реактора типа БН и наличие семи соосных струй, а также тридцати струй на встречных направлениях.

Для определения температурных характеристик на выходе из ТВС при различных температурах теплоносителя был проведен специальный эксперимент [2–5], в котором измерялось распределение температуры над выходными отверстиями ТВС.

Проблема численного исследования поставленной задачи смешения струй состоит в том,

что необходимо учитывать большое количество встречных и соосных струй со сложной пространственной геометрией входных устройств, моделировать течение в самих входных устройствах, принимать во внимание достаточно высокое число Рейнольдса и малое число Прандтля. Характер течения с выраженной периодичностью также осложняет алгоритмы постобработки результатов расчетов.

Среди способов решения этой проблемы в последнее время все большее внимание привлекает метод Кабаре (Cabaret), разработанный в ИБРАЭ РАН (г. Москва) и ориентированный на проведение параллельных вычислений на современном программно-аппаратном уровне [6–9]. Метод предусматривает явное по времени решение уравнений гидродинамики и отличается бездиссипативностью, хорошими дисперсионными свойствами, компактностью шаблона, монотонностью, оптимальной аппроксимацией временных и пространственных производных [6]. В методе в разное время использовались разные структуры данных (OpenFOAM, MOAB и другие), методы генерации и разбиения сетки, а также различные реализации сетевого протокола.

Целью данной работы была реализация схемы Кабаре в задаче со сложной геометрией в приближении слабосжимаемой жидкости на неструктурированных гексагональных ячейках и сравнение результатов вычислений с данными натуральных экспериментов. Сравнение свойств схем, как правило, производится на простых модельных задачах без усложнения геометрии области. Такая работа проделана для уравнения переноса в одномерном случае [7]. Позднее одномерная схема обобщена на многомерный случай [8] и было показано, что при переходе на другой шаблон при соответствующем выборе потоковых и консервативных переменных схема Кабаре сохраняет диссипативные свойства. Свойства схемы на гексагональных ячейках рассмотрены в [9]. Тестовые расчеты показали преимущество схемы Кабаре над известными схемами второго порядка, применяемыми для задач аэроакустики. В гидродинамике используется система уравнений Навье–Стокса, также применяемая в аэроакустике. Из этих работ следует, что в излагаемом в статье случае схема обладает вторым порядком точности.

Созданный на основе метода Кабаре программный комплекс CABARET хорошо зарекомендовал себя в решении международных, так называемых слепых, тестов — задач вычислительной гидродинамики для ядерной безопасности (CFD for Nuclear Reactor Safety Application), рассматривающих смешение разнотемпературных струй в тройнике [10] и течение в активной зоне с турбулизаторами [11]. Представляется интересным использование этого метода в задаче смешения разнотемпературных струй с жидкометаллическим теплоносителем, так как большинство известных методов не всегда применимы в области низких чисел Прандтля.

2. Описание эксперимента

Схематичный вид экспериментального стенда [2, 3] показан на рисунке 1, *а*. Его коллектор 1 представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 122 мм. В нижней части коллекторной камеры гексагональным образом с шагом 39 мм расположено семь ТВС 2 (Рис. 1, *б*). Каждая ТВС состоит из головки 3 и пучка стержней 4 (Рис. 1, *в*), имитирующих тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) — главные конструктивные составляющие активной зоны ядерного реактора. Головка 3 — это сужающийся осесимметричный канал, в стенках которого имеется шесть арочных отверстий 5. Отверстия головок, образующих треугольник, ориентированы на его центр тяжести *С* (см. Рис. 1, *б*).

Натриевый теплоноситель поступает в головки ТВС 3 снизу из области стержней 4. Затем он перемещается в камеру коллектора 6 и после через ее верхние отверстия 7 выходит в сборную камеру 8. Выходные отверстия 7 располагаются в два ряда по длине окружности через равные промежутки (всего 24 отверстия) и находятся выше верхних срезов головок на расстоянии 190 мм от них (Рис. 1, *а*).

Рассматривался случай перегрева теплоносителя в одной из семи ТВС, а именно в центральной сборке, который возникал либо вследствие подачи теплоносителя более высокой температуры, либо за счет его подогрева электронагревателями. Начало системы координат, использованной при расчетах, располагалось в центре среза головки центральной ТВС с горячей струей (Рис. 1, *б*); ось Oz была направлена вертикально вверх; ось Ox проходила через центр среза самой правой головки ТВС. Ось Oy дополняла правую тройку векторов ортогонального базиса.

Для измерения температуры в разных точках экспериментального устройства применялся термопарный зонд 9 (Рис. 1, *а*), который состоял из набора хромель-алюмелевых термопар 10, помещенных в капилляры из нержавеющей стали. Зонд мог перемещаться по высоте от среза головок $z = 0$ до верхнего положения $z = 200$ мм. Погрешность измерения температуры термопарами в рабочем диапазоне составляла $0,1^\circ\text{C}$. Размещение термопар показано на рисунке 1, *в*. Термопары имели порядковые номера и располагались в центрах головок или равноудаленных от центров точек радиусами $R_2 = 12,5$ мм, $R_3 = 22,5$ мм, $R_4 = 34$ мм, $R_5 = 39$ мм. Термопара 1 помещалась в центр центральной головки, термопара 31 — в центр правой нижней головки.

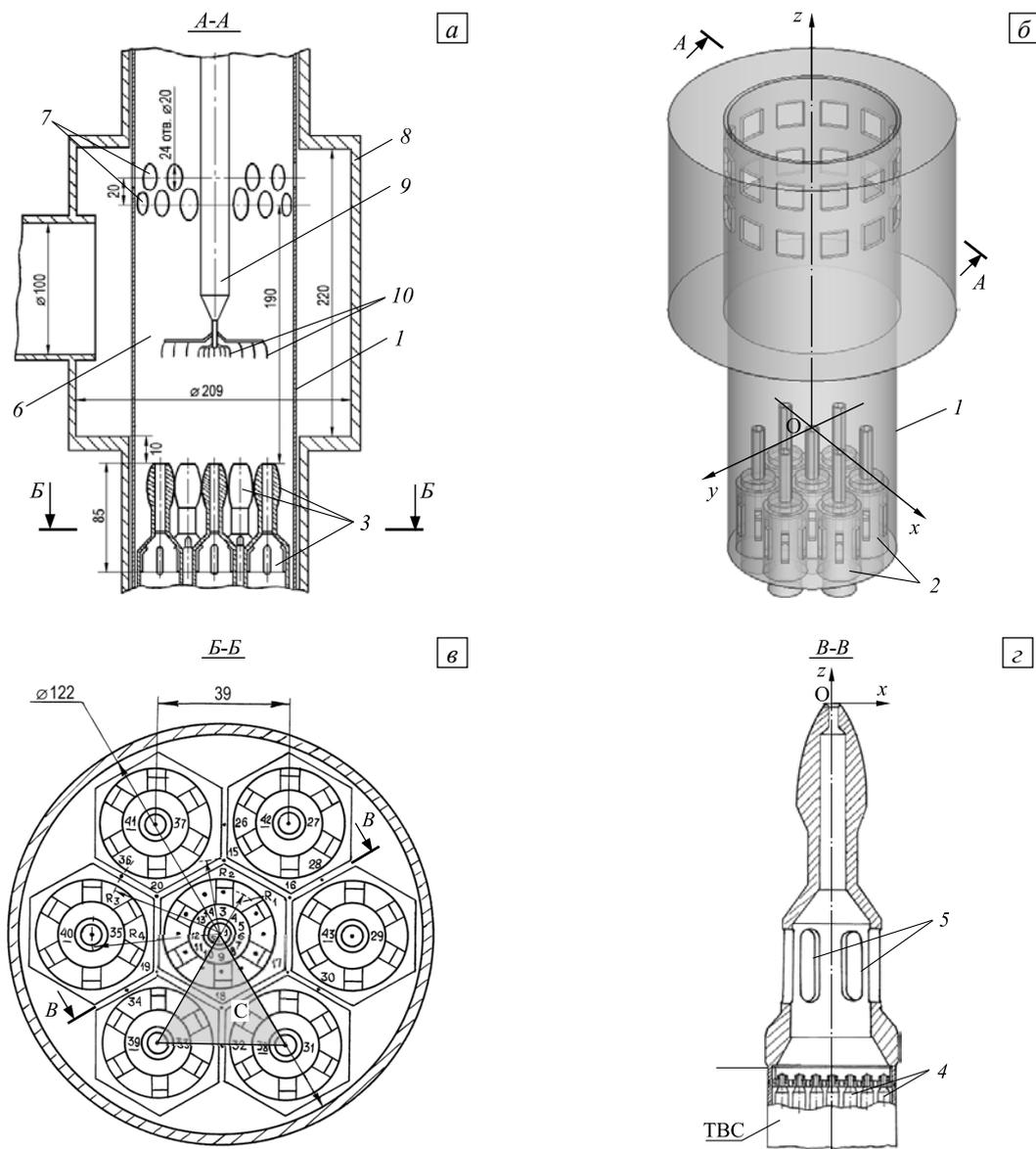


Рис. 1. Схематичный вид экспериментального стенда и его элементов: сечение стенда в плоскости симметрии (а) и его геометрическая модель (расчетная область) (б); сечение коллектора в нижней части (в); сечение одиночной ТВС в плоскости симметрии (г); размеры указаны в мм

3. Методика численного моделирования

В настоящей работе численно, с помощью программного комплекса САВАРЕТ [10], моделировалось течение в коллекторе экспериментального стенда (вплоть до сборной камеры) и в области отверстий головок ТВС; течение внутри ТВС, в области стержневых пучков — ТВЭЛов реактора, не рассматривалось. Нижняя граница расчетной области совпадала с плоскостью, в которой располагаются верхние торцевые срезы стержневого пучка. Вид геометрии расчетной области представлен на рисунке 1, б).

Согласно используемой методике для описания течения применялись уравнения слабосжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} = \eta \rho \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = \eta \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho T u}{\partial x} + \frac{\partial \rho T v}{\partial y} + \frac{\partial \rho T w}{\partial z} = \frac{\eta \rho}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

$$p = (\rho - \rho_0) c^2.$$

Здесь: t — время; ρ — плотность; ρ_0 — начальная плотность; p — давление; c — скорость распространения звука; T — температура; η — коэффициент кинематической вязкости; Pr — число Прандтля; u, v, w — компоненты скорости в декартовой системе координат $Oxyz$.

Приближение слабосжимаемой жидкости позволило использовать явный метод и, соответственно, сравнительно простые численные схемы, имеющие, с точки зрения параллелизации, меньшие ограничения. С их использованием исследовалось турбулентное перемешивание в жидкости вдали от стенок, где турбулентный теплоперенос осуществляется в основном крупными вихрями. При этом взаимодействие со стенками не играло большой роли (теплообмен вообще отсутствовал, задавалось адиабатическое условие на стенках). Без применения специальной модели турбулентности удалось учесть и теплопроводность при малых числах Прандтля.

В данной работе обсуждаются результаты моделирования одного из режимов, описанных в эксперименте [2–5]. Параметры расчета были следующими: плотность теплоносителя 904 кг/м^3 ; кинематическая вязкость $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; число Прандтля $0,0077$ (это соответствует параметрам натрия для средней температуры в осевом сечении); температуры на входе в центральную и периферийные ТВС $148,1^\circ\text{C}$ и $122,5^\circ\text{C}$ соответственно; средняя скорость на входе в горячую ТВС составляла $0,94 \text{ м/с}$, средняя скорость на входе в холодные ТВС — $0,96 \text{ м/с}$. Данные соответствуют опыту № 5 из работы [5].

На входе в центральную и периферийные ТВС задавались граничные условия вдува, на нижней части сборной камеры — условие выхода из области с нулевым относительным давлением, на оставшихся поверхностях — условия прилипания и непроницаемой адиабатической стенки (теплообмен со стенками не учитывался). Скорости на входе в систему считались постоянными и распределенными однородно по сечению головок.

Для обеспечения устойчивости решения уравнений теплопроводности использовалась итерационная процедура без явного расщепления по физическим процессам. Уравнения для компонент скорости течения решались методом установления, в результате чего получалось стационарное в статистическом смысле решение. Длительность счета существенно зависела от начального приближения, поэтому в некоторых случаях в качестве такового использовалось стационарное решение, вычисленное с помощью коммерческого кода CFX с $k - \epsilon$ моделью турбулентности.

Примененный подход верифицировался на известных международных тестах для задач течения в тройнике со смешением струй с разными температурами [10] и течения в ТВС с завихрителями [11]. Технология проведения вычислительного эксперимента описана одним из авторов настоящей статьи в [12].

4. Подготовка геометрической модели и разработка сеточной модели с ячейками гексагональной формы

Этапы математического моделирования течения включали подготовку геометрической модели, создание сеток, декомпозицию сеток для многопроцессорных вычислений, проведение вычислений и постобработку числовых данных.

Точные геометрические области, соответствующие чертежам экспериментального стенда, не могут непосредственно использоваться для создания сеток и, как это принято на практике, их подвергают некоторому упрощению. Геометрическая модель содержит только твердотельные элементы, фактически формирующие канал, в котором происходит течение жидкости.

Программный комплекс CABARET основан на явной по времени процедуре решения нестационарных уравнений гидродинамики, при этом необходимость создания шестигранных сеток требует разделения расчетного объема на подобъемы, противоположные грани которых во всем пространстве строго согласованы и имеют одну и ту же топологию, а боковые грани представляют собой четырехугольники. В геометрической модели должны быть преобразованы осреднением все поверхности, не являющиеся плоскостями или цилиндрами.

Вид сетки в вертикальном сечении и в горизонтальном сечении $B-B$ представлен на рисунке 2. Важной характерной особенностью данной задачи являются сложные по структуре блоки шестигранных ячеек, из которых состоит сетка. Блоки заполняют пространство между головками и позволяют без потери точности аппроксимации получить решение турбулентного смешения встречных струй (в зоне окон шесть двойных встречных и шесть тройных встречных струйных течений, пересекающихся под углом 120°).

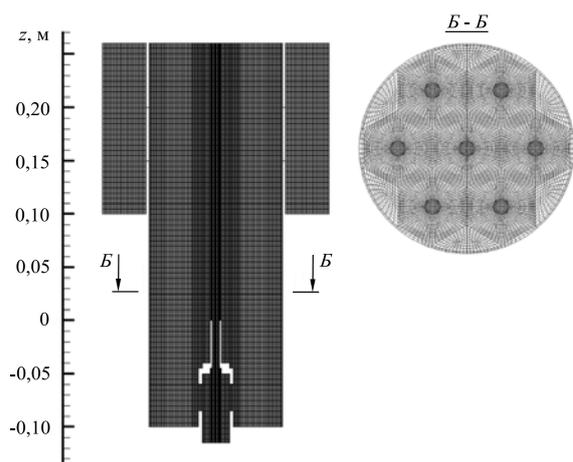


Рис. 2. Вид сетки в вертикальном и горизонтальном (Б–Б) сечениях (см. Рис. 1); вертикальное сечение проходит по одной из плоскостей симметрии, пересекаящих только центральную ТВС

При компоновке дискретной структуры расчетной области сеточные блоки сшиваются узел в узел с блоками в зоне смешения семи вертикальных струй. В данной зоне течение встречных струй сопрягается с истечением струй в верхнюю часть расчетного объема.

В средней зоне генерируется достаточно подробная сетка, которая позволяет сохранить точность решения в этой части расчетной области. При этом блоки средней зоны сопрягаются с системой блоков верхней части, имеющей отверстия выходной камеры экспериментальной установки, и обеспечивают хорошую детализацию сетки в зоне поворота течений в направлении выходной камеры.

Представленная сеточная модель была выбрана в качестве окончательной более чем из десяти промежуточных моделей (секторных и гибридных). Работы

проводились на кластерах Скиф и Ломоносов (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва). Общее количество затраченного на расчеты процессорного времени составило около четырех миллионов процессоро-часов.

5. Сравнение с экспериментом

Расчет проводился на сетке, содержащей 4,6 млн ячеек. Характер течения показан на рисунке 3, где приведены поля температур, вертикальной скорости и ротора скорости жидкого натрия в плоскости, проходящей через оси холодной и горячей головок ТВС. Слева течет периферийный поток с большей скоростью и меньшей температурой, справа течет центральный поток с меньшей скоростью и большей температурой. Отсутствие экспериментальных данных по скоростям не позволило сравнить их количественно. Распределения названных параметров изображены на светло-сером фоне с использованием непрерывной шкалы. Минимальным значениям параметров соответствует белый цвет. Рисунок свидетельствует, что смешение происходит существенно нестационарно, с образованием достаточно крупных вихревых структур в зоне встречи истекающих из окон ТВС струй. После поворота встречных струй турбулентная структура распространяется вверх по потоку. Вверх по потоку на полях температуры и вертикальной скорости также заметны соосные струи. Так как скорость жидкости, обладающей большей температурой, меньше скорости жидкости с меньшей температурой, вихревые структуры в следе справа имеют больший шаг.

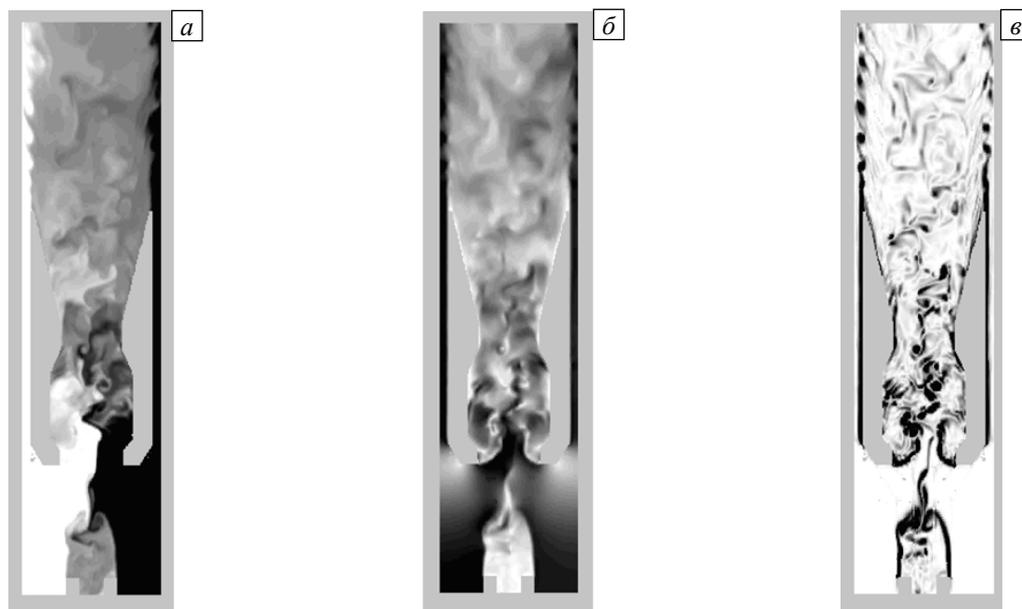


Рис. 3. Вид полей температуры (а), осевой скорости (б) и модуля ротора скорости (в) в плоскости симметрии струй

Сравнение расчета и эксперимента проводилось по разности между температурой в произвольной точке и входной температурой натрия ($122,5^{\circ}\text{C}$), подаваемого в камеру коллектора через боковые ТВС. На рисунке 4 представлены осредненные по времени радиальные профили температуры (относительно температуры натрия на входе) на пяти различных горизонтальных сечениях $z = 0; 50; 100; 150; 200$ мм. Указанные значения разностей температур в эксперименте для всех радиальных позиций, кроме центра ($R_2 = 12,5$ мм, $R_3 = 22,5$ мм, $R_4 = 34$ мм, $R_5 = 39$ мм), получены осреднением по времени значений температур, измеренных в равноудаленных от оси z точках, соответствующих точкам расположения термопар. Из рисунка видно, что расчетные значения температурных разностей с хорошей точностью соответствуют экспериментальным данным. Погрешность в расчете температуры не превышает 2°C при характерной разнице между горячим и холодным потоками в 20°C .

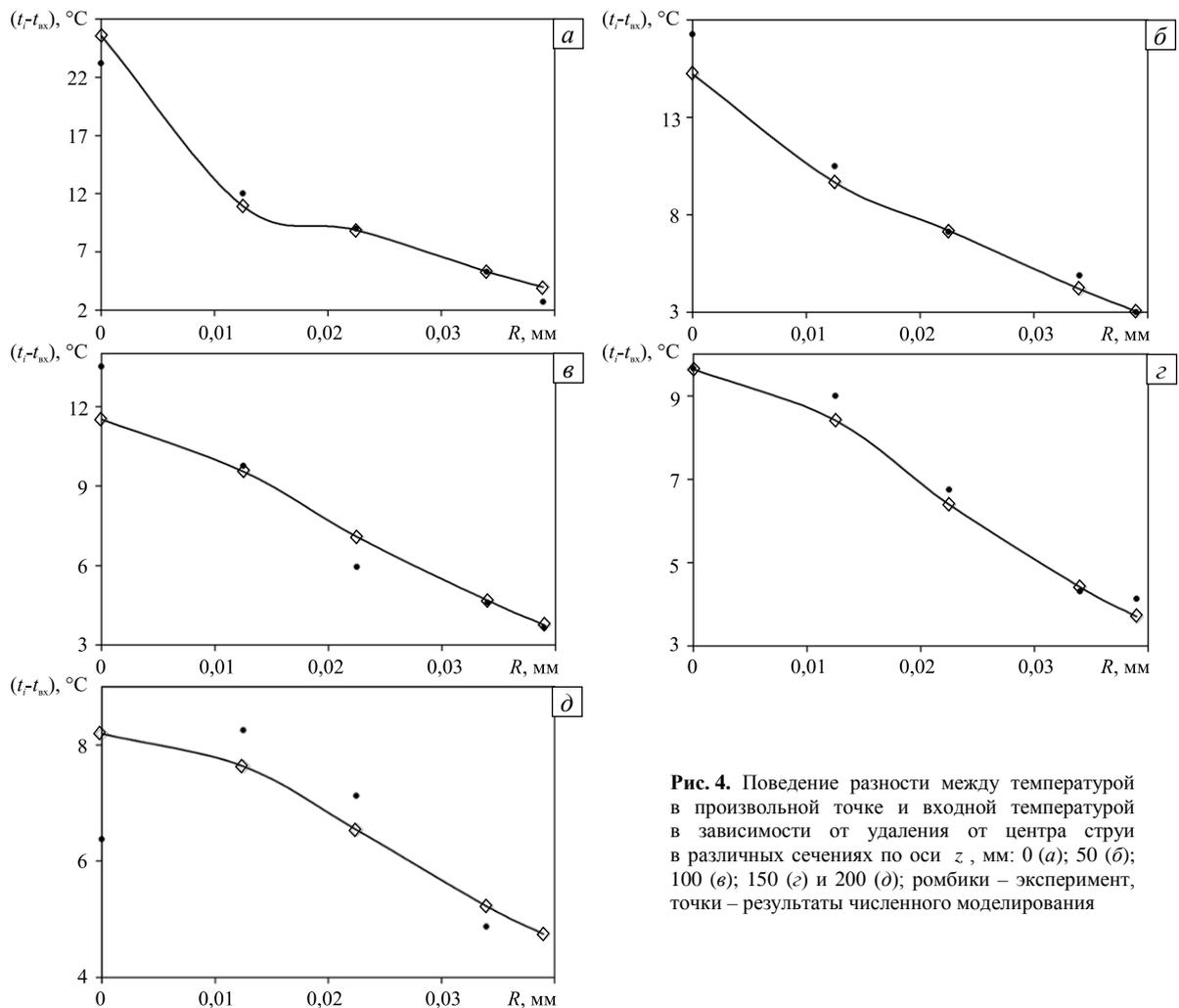


Рис. 4. Поведение разности между температурой в произвольной точке и входной температурой в зависимости от удаления от центра струи в различных сечениях по оси z , мм: 0 (а); 50 (б); 100 (в); 150 (г) и 200 (д); ромбики – эксперимент, точки – результаты численного моделирования

Сопоставление спектральных характеристик пульсаций температуры в разных точках представлено на рисунке 5. Спектральные характеристики флуктуаций температуры вычислялись как Фурье-образ автокорреляционной функции. Преобразование проводилось по ряду из 1600 точек во временном интервале от 4 до 12 с. Число гармоник в расчете равнялось числу гармоник в обработке эксперимента. На рисунке 5 для сравнения приведены экспериментальные данные. Расчетные и экспериментальные спектры флуктуаций температуры получены для точки в центре струи (термопара 1) и на удалении от центра — в точке с радиусом $R_5 = 39$ мм (термопара 31) для сечения $z = 200$ мм. Из представленных данных следует, что для рассмотренного сечения

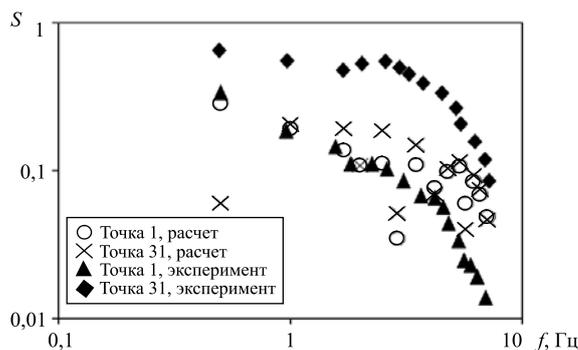


Рис. 5. Спектры флуктуаций температуры в точках размещения термопар 1 и 31; $z = 200$ мм

следует, что для рассмотренного сечения

измеренные и расчетные спектры имеют подобный вид, и можно утверждать, что на высоких частотах наклон спектров дает качественное согласие с экспериментом.

6. Заключение

Проведенное моделирование эксперимента с нестационарным турбулентным движением теплопроводящей жидкости в камере смешения нескольких разнотемпературных струй показало:

- подход, использованный в [10–12], может успешно применяться и в задаче моделирования неизотермических течений жидкостей с малым числом Прандтля, то есть течений жидких металлов в областях со сложной геометрией;
- полученные результаты расчета средней температуры в разных точках стенда имеют хорошее совпадение с экспериментальными данными;
- относительно спектральных характеристик пульсаций температуры можно констатировать, что наблюдается удовлетворительное качественное согласие с экспериментом для сечения, достаточно удаленного от выходных головок имитаторов ТВС ($z = 200$ мм).

В целом же можно утверждать, что методика численного исследования CABARET может быть использована для качественной оценки пространственной неоднородности и пульсационных характеристик полей скоростей и температур при смешении струй в объеме сложной геометрии, типичной для верхней камеры реактора с жидкометаллическим теплоносителем.

Авторы выражают благодарность Кузиной Ю.А. за консультации и помощь.

Литература

1. *Chacko S., Chung Y.M., Choi S.K., Nam H.Y., Jeong H.Y.* Large-eddy simulation of thermal striping in unsteady non-isothermal triple jet // *Int. J. Heat Mass Tran.* – V. 54, N. 19-20. – P. 4400-4409. DOI
2. *Жуков А.В., Могильнер А.И., Авдеев Е.Ф. и др.* О смешении струй натрия в коллекторе тепловыделяющих сборок: Препр. / Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского. – Обнинск, 1986. – 12 с.
3. *Жуков А.В., Иванов Е.Ф., Мужанов А.Б. и др.* Исследование на модели флюктуации температуры в потоке натрия на выходе из ТВС быстрого реактора // Междотрасл. конф. «Исследование гидродинамики и теплообмена в элементах ЯЭУ. Статистические методы»: Тез. докл., 1985, Москва: ФЭУ, 1985.
4. *Zhukov A.V., Ivanov E.Ph., Kovtun S.N. et al.* Experiments on mixing of sodium jets with a different temperature in space above fuel pin heads in fast reactor subassembly of BN-350 and BN-600 types. IAEA-IWGFR/90 // *Proc. of Specialist's Meeting on "Correlation between material properties and thermohydraulics in LMFR's"*, France, Aix-en-Provence, November 22-24, 1994.
5. *Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. и др.* Некоторые вопросы смешения разнотемпературных струй теплоносителя над активной зоной быстрого реактора // Научн.-техн. конф. «Теплофизика-2012. Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах»: Тез. докл., 24-26 октября 2012 г., Обнинск. – С. 45-47.
6. *Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А.* Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. – М.: Изд-во МГУ, 2013. – 472 с.
7. *Головизнин В.М.* Балансно-характеристический метод численного решения одномерных уравнений газовой динамики в эйлеровых переменных // *Матем. моделирование.* – 2006. – Т. 18, № 11. – С. 14-30.
8. *Головизнин В.М., Карабасов С.А., Кондаков В.Г.* Обобщение схемы Кабаре на двумерные ортогональные расчетные сетки // *Матем. моделирование.* – 2013. – Т. 25, № 7. – С. 103-136.
9. *Karabasov S.A., Goloviznin V.M.* New efficient high-resolution method for nonlinear problems in aeroacoustics // *AIAA J.* – 2007. – V. 45, N. 12. – P. 2861-2871. DOI
10. *Obabko A.V., Fischer P.F., Tautges T.J. et al.* Large eddy simulation of thermo-hydraulic mixing in a T-Junction // *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Other Applications*, November 2012, In-Tech Open Access Company. – 25 p. (URL: <http://www.mcs.anl.gov/papers/P3015-0712.pdf>).
11. *Goloviznin V.M., Zaitsev M.A., Karabasov, S.A.* A highly scalable hybrid mesh CABARET MILES method for MATIS-H Problem // *CFD for Nuclear Reactor Safety Application (CFD4NRS-4) Workshop*, South Korea, Daejeon, September 10-12, 2012. – P. 104.
12. *Зайцев А.М.* Технология параллельных вычислений теплогидравлики программы "CABARET" // *Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности / Под ред. акад. В.А. Садовниченко, акад. Г.И. Савина, чл.-корр. РАН Вл.В. Воеводина.* – М.: Изд-во МГУ, 2010. – С. 173-180.

References

1. *Chacko S., Chung Y.M., Choi S.K., Nam H.Y., Jeong H.Y.* Large-eddy simulation of thermal striping in unsteady non-isothermal triple jet // *Int. J. Heat Mass Tran.* – V. 54, N. 19-20. – P. 4400-4409. DOI
2. *Zhukov A.V., Mogil'ner A.I., Avdeev E.F. i dr.* O smeshenii strui natriia v kollektore teplovydeliaiushchikh sborok: Prepr. / *Fiziko-energeticheskii institut im. A.I. Leipunskogo.* – Obninsk, 1986. – 12 s.
3. *Zhukov A.V., Ivanov E.F., Muzhanov A.B. i dr.* Issledovanie na modeli fliuktuatsii temperatury v potoke natriia na vykhode iz TVS bystrogo reaktora // *Mezhotrasl. konf. «Issledovanie gidrodinamiki i teploobmena v elementakh IaEU. Statisticheskie metody»:* Tez. dokl., 1985, Moskva: FEU, 1985.

4. Zhukov A.V., Ivanov E.Ph., Kovtun S.N. et al. Experiments on mixing of sodium jets with a different temperature in space above fuel pin heads in fast reactor subassembly of BN-350 and BN-600 types. IAEA-IWGFR/90 // Proc. of Specialist's Meeting on "Correlation between material properties and thermohydraulics in LMFBR's", France, Aix-en-Provence, November 22-24, 1994.
5. Zhukov A.V., Kuzina Iu.A., Sorokin A.P. i dr. Nekotorye voprosy smesheniia raznotemperaturnykh strui teplonositel'ia nad aktivnoi zonoj bystrogo reaktora // Nauchn.-tekhn. konf. «Теплофизика-2012. Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах»: Tez. dokl., 24-26 oktiabria 2012 g., Obninsk. – S. 45-47.
6. Goloviznin V.M., Zaitsev M.A., Karabasov S.A., Korotkin I.A. Novye algoritmy vychislitel'noi gidrodinamiki dlia mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh kompleksov. – M.: Izd-vo MGU, 2013. – 472 s.
7. Goloviznin V.M. Balansno-kharakteristicheskii metod chislennogo resheniia odnomernykh uravnenii gazovoi dinamiki v eilerovykh peremennykh // Matem. modelirovanie. – 2006. – T. 18, N. 11. – S. 14-30.
8. Goloviznin V.M., Karabasov S.A., Kondakov V.G. Obobshchenie skhemy Kabare na dvumernye ortogonal'nye raschetnye setki // Matem. modelirovanie. – 2013. – T. 25, N. 7. – S. 103-136.
9. Karabasov S.A., Goloviznin V.M. New efficient high-resolution method for nonlinear problems in aeroacoustics // AIAA J. – 2007. – V. 45, N. 12. – P. 2861-2871. DOI
10. Obabko A.V., Fischer P.F., Tautges T.J. et al. Large eddy simulation of thermo-hydraulic mixing in a T-Junction // Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Other Applications, November 2012, In-Tech Open Access Company. – 25 p. (URL: <http://www.mcs.anl.gov/papers/P3015-0712.pdf>).
11. Goloviznin V.M., Zaitsev M.A., Karabasov, S.A. A highly scalable hybrid mesh CABARET MILES method for MATIS-H Problem // CFD for Nuclear Reactor Safety Application (CFD4NRS-4) Workshop, South Korea, Daejon, September 10-12, 2012. – P. 104.
12. Zaitsev A.M. Tekhnologiya parallel'nykh vychislenii teplogidravliki programmy "CABARET" // Superkomp'yuternye tekhnologii v nauke, obrazovanii i promyshlennosti / Pod red. akad. V.A. Sadovnichego, akad. G.I. Savina, chl.-korr. RAN VI.V. Voevodina. – M.: Izd-vo MGU, 2010. – S. 173-180.

Поступила в редакцию 28.05.13; опубликована в электронном виде 27.12.13

Сведения об авторах

Зайцев Алексей Михайлович, инж., асп., Институт безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), 115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52; E-mail: azai@ibrae.ac.ru

Семенов Владимир Николаевич, дфмн, проф., зав.отд., ИБРАЭ РАН; E-mail: sem@ibrae.ac.ru

Швецов Юрий Евгеньевич, ктн, снс, внс, Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского (ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского), 249033, Калужская обл., Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1; E-mail: Shvetsov@ippe.ru