

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.58

М.А. Большухин, А.В. Будников, В.И. Фомичев, Д.Н. Свешников, Р.И. Романов

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ CFD ПРОГРАММ ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Рассматриваются актуальные вопросы использования программ вычислительной гидродинамики (CFD) в атомной энергетике, проблемы верификации и отработки технологии их использования на основе верификационных экспериментов. В качестве верификационных экспериментов рассматриваются эксперименты по смешению потоков, характеризующихся существенным влиянием сил плавучести, обусловленных разностью плотностей неравномерно прогретой жидкости, как наиболее актуальных для атомной энергетике. Представлено краткое описание проводимых экспериментов и выполненных на их основе верификационных расчетов и сделан вывод о конкретных результатах адаптации и верификации CFD к решению практических задач расчетного обоснования отдельных элементов конструкции и сложных режимов работы реакторных установок.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, смешение, конвекция, верификация cfd, вихреразрешающие модели.

В последнее десятилетие в атомной энергетике широко внедряются программы трехмерного теплогидравлического расчета (CFD). Актуальность применения CFD программ подтверждается большим числом научных российских и зарубежных публикаций и рядом специализированных научных конференций, посвященных этой теме. К наиболее значимым и представительным в этой области можно отнести работы, координируемые в рамках OECD/NEA (OECD / Nuclear Energy Agency) – в Европе, и в рамках программы CASL (Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors) – в США.

В частности, начиная с 2002 года, OECD/NEA проводит ежегодные конференции CFD4NRS (CFD for Nuclear Reactor Safety), посвященные задачам и проблемам использования CFD программ в атомной энергетике. На этих конференциях методом экспертной оценки определяются наиболее приоритетные цели использования CFD программ и проблемные вопросы, которые необходимо решить для достижения поставленных целей.

К наиболее приоритетным целям использования CFD программ международные эксперты относят:

- моделирование процессов перемешивания потоков с разными температурами или потоков, отличающихся концентрацией борной кислоты в камерах реактора;
- моделирование процессов термоциклического нагружения элементов конструкций;
- моделирование стратифицированных течений в горизонтальных или слабо-наклоненных трубопроводах;
- расчет концентраций водорода и аэрозолей в помещениях защитной оболочки.

Обобщив перечисленные цели, можно констатировать, что приоритетным направлением использования CFD программ в атомной энергетике является моделирование процессов

смещения потоков, характеризующихся существенным влиянием сил плавучести, обусловленных разностью плотностей неравномерно прогретой жидкости.

Интересно отметить: несмотря на то, что история успешного применения коммерческих CFD программ насчитывает уже несколько десятилетий, накоплен огромный положительный опыт их применения в авиации, автомобиле-, ракетостроении, возможность их использования для поставленной цели появилась относительно недавно, вслед за развитием относительно дешевых и доступных высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных ресурсов (суперЭВМ). Указанная особенность объясняется следующим образом.

Традиционно в CFD программах решаются не исходные, а усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). Усреднение по Рейнольдсу предполагает разложение всех, входящих в уравнение Навье-Стокса переменных на среднюю во времени и пульсационную (хаотически изменяющуюся) составляющие. Решение записывается для средних во времени составляющих, а влияние на средние характеристики потока пульсационных составляющих описывается моделями турбулентности, в которых обычно предполагается, что это влияние может быть описано введением дополнительной *турбулентной* вязкости. Процессы теплопереноса (или переноса другой *скалярной* переменной) моделируется на основании предположения о тепловой и гидродинамической аналогии.

Развитие моделей турбулентности, основанных на использовании RANS подхода, позволило на несколько порядков снизить размерности задач по сравнению с методом прямого моделирования уравнений Навье-Стокса (DNS), что и обеспечило возможность широкого применения CFD программ для решения ряда практических задач.

Описанный RANS подход хорошо зарекомендовал себя и при описании процессов переноса в турбулентном пограничном слое, но оказался неработоспособным при моделировании процессов смешения в центре потока (так как в соответствии с гидродинамической аналогией малость градиентов скоростей в ядре потока должна приводить к малости параметров, характеризующих смешение потоков). А высокая турбулентная вязкость, характерная для RANS подхода, препятствует возникновению вихревых движений в центре потока.

Альтернативой RANS подходу, снимающей ограничения на корректность моделирования процессов смешения в потоке, является использование так называемых вихререзающих методов. В этих методах исходная система уравнений и используемая в расчетах пространственно-временная дискретизация обеспечивают, как минимум, адекватное моделирование «крупных» вихрей в потоке («мелкие» вихри, размер которых меньше размера расчетной ячейки, и в этом подходе моделируются дополнительной, *подсеточной* вязкостью). Прямое моделирование крупных, энергонесущих вихрей обеспечивает корректное описание процессов смешения в потоке, но накладывает ряд дополнительных проблемных вопросов.

Во-первых, использование вихререзающих методов приводит к существенному росту (по сравнению с RANS подходом) размерности решаемых задач (величина этого роста составляет несколько порядков и зависит от конкретной вихререзающей модели). Причем даже на современном уровне развития средств вычислительной техники, строгое удовлетворение требований вихререзающих моделей к пространственно-временной дискретизации являются трудновыполнимым.

Во-вторых, для использования этих моделей требуется дополнительное задание (в дополнении к условиям RANS подхода) неочевидных начальных и граничных условий по пульсационным характеристикам потока.

Указанные проблемные вопросы по-разному решаются в различных вихререзающих моделях. Разнообразие этих моделей свидетельствует одновременно и о высокой актуальности задачи, и об отсутствии к настоящему времени универсального решения, пригодного для широкого класса задач.

Поэтому использование CFD программ в атомной энергетике невозможно без этапа

адаптации и верификации на представительных экспериментальных данных, причем адаптация и верификация CFD программ должны выполняться для каждого вновь возникающего класса задач.

С целью формирования базы представительных экспериментальных данных для верификации CFD программ в ОАО «ОКБМ Африкантов» создана специализированная гидродинамическая лаборатория. Для измерения нестационарных полей теплогидравлических параметров в лаборатории используются самые современные системы:

- тепловизор – для измерения полей температур (1, 2);
- лазер – для измерения полей скоростей в потоке.

Экспериментальные исследования с использованием лазера в лаборатории выполняются в тесном сотрудничестве с Институтом механики сплошных сред Уральского отделения РАН (ИМСС УрО РАН) (3). В частности, совместно с ИМСС УрО РАН был поставлен и проведен описываемый далее уникальный эксперимент по исследованию естественной конвекции в кубической полости со стороной $D=250$ мм, заполненной дистиллированной водой, подогреваемой снизу и охлаждаемой сверху (рис. 1).

В эксперименте поле скорости восстанавливалось с помощью метода цифровой трассерной визуализации (PIV), основанном на измерении перемещения полиамидных частиц нейтральной плавучести в плоскости лазерного светового ножа. Температурные пульсации регистрировались с помощью 11 дифференциальных медь - константановых термопар диаметром 0.2 мм.

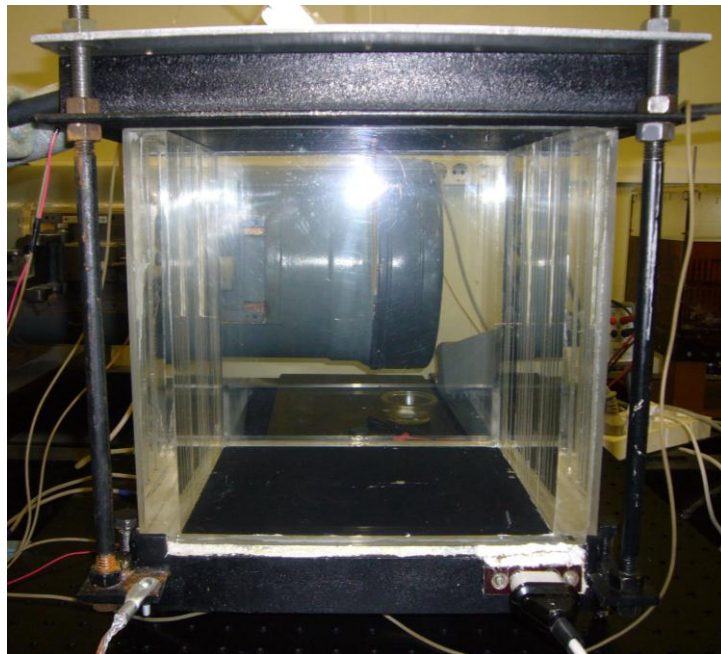


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования свободной конвекции

Были выбраны два экспериментальных случая, отличающиеся режимами крупномасштабной циркуляции: рассматривались задачи о конвекции в прямоугольных полостях с аспектным соотношением $\Gamma = 1$ (куб) и $\Gamma = 0.1$ (щель). Число Рэлея $Ra = 4.4 \cdot 10^9$, число Прандтля $Pr = 7$. Для численного моделирования конвекции использовался вихререзающий LES метод, при этом использовалась равномерная расчетная сетка, состоящая из 3 млн элементов для куба и 1.5 млн элементов для щели.

В результате сравнения расчетных и экспериментальных данных для куба отмечено, что расчет не только воспроизвел среднюю структуру потока, но и с хорошей точностью воспроизвел максимальные значения скорости (рис. 2).

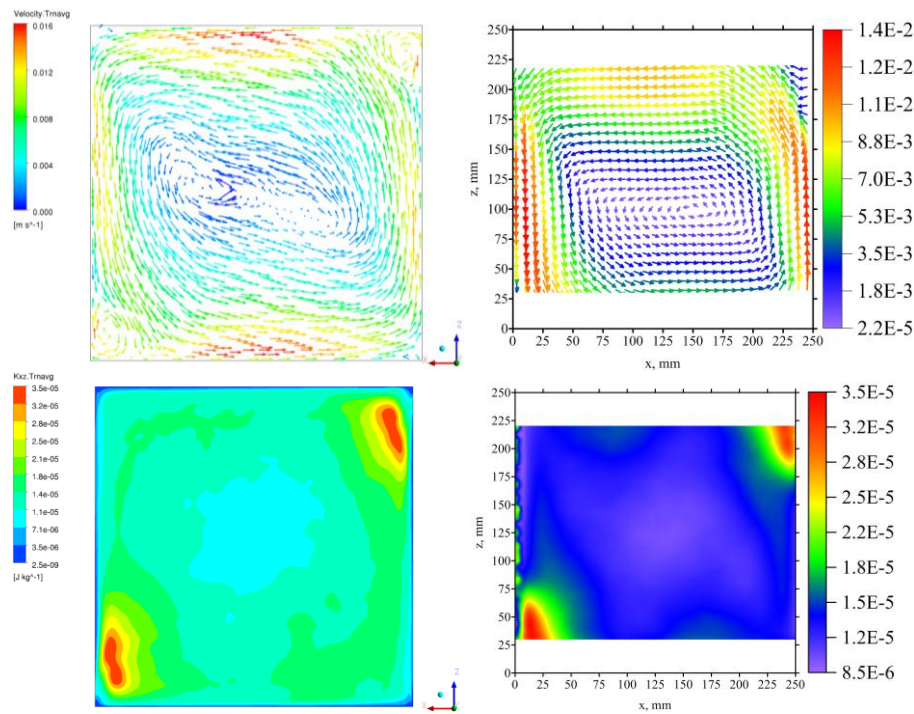


Рис. 2. Среднее поле скорости (наверху) и плотность энергии турбулентных пульсаций (внизу) в центральном вертикальном сечении кубической полости. Расчет (слева) и эксперимент (справа)

В случае тонкой щели (рис. 3) направление крупномасштабной циркуляции меняется многократно, выделенного направления нет и структура среднего поля становится более сложной. Значения средних скоростей становятся на порядок меньше и детальная картина поля скорости в расчете и эксперименте не столь похожа (в этом случае для хорошего совпадения нужны существенно большие времена осреднения), хотя качественное совпадение расчета и эксперимента есть и значения максимальных значений скорости также близки.

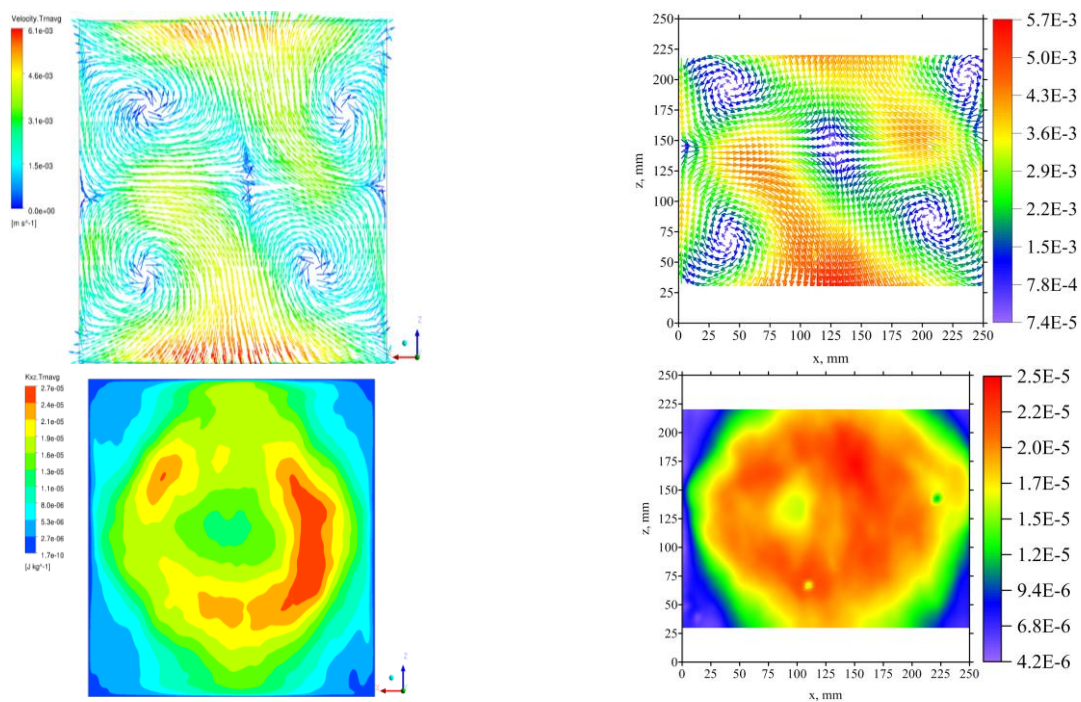


Рис. 3. Среднее поле скорости (наверху) и плотность энергии турбулентных пульсаций (внизу) в центральном вертикальном сечении щели ($\Gamma=0.1$). Расчет (слева) и эксперимент (справа)

Выполненные расчеты для двух случаев ($\Gamma=1$ и $\Gamma=0.1$) показали, что метод LES позволяет адекватно воспроизвести как среднее течение, так и пространственное и спектральное распределение турбулентных пульсаций.

Экспериментальные исследования смешения неизотермических потоков выполнены на модели Т-образного соединения, отличительной особенностью которого является форма подводящего трубопровода, которая позволяет в потоке перед входом в Т-образное соединение образовать крупный вихрь, закручивающий поток (рис. 4). На рис. 4 представлено поле температур, регистрируемое тепловизором, где отчетливо видна закрутка потоков в области смешения.

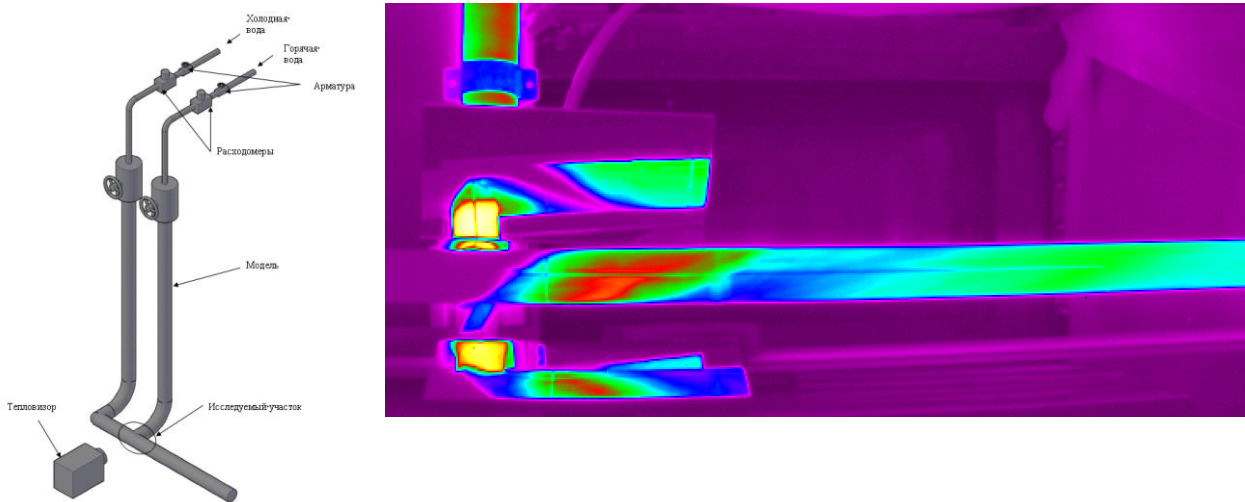


Рис. 4. Экспериментальная модель тройникового соединения и поле температур с закруткой потока в месте смешения, регистрируемое тепловизором

Большой интерес представляет проверка способности различных (RANS или SRS) подходов предсказать такую закрутку потока (рис. 5). Расчеты были выполнены с использованием структурированной гексаэдрической сетки, состоящей из 2 млн элементов, при этом характерный размер ячейки – 0.5 мм и среднее значение коэффициента $Y^+ \sim 30$.

Далее приведены поля температур в стенке, полученные экспериментально и в результате расчетов с использованием LES подхода для режима с расходом холодной и горячей воды по $G=1$ [$\text{м}^3/\text{ч}$], что соответствует скорости $V \sim 0,14$ м/с и температурами 17°C, 45°C холодной и горячей воды соответственно.

LES модель турбулентности позволяет предсказать закрутку потока, в отличие от RANS, тем самым учитывая предысторию потока перед смешением, что особенно актуально для расчетов реальных инженерных задач.

Несмотря на значительный потенциал собственных (выполняемых в ОАО «ОКБМ Африкантов») экспериментальных исследований, для верификации используются результаты экспериментов, выполненных по заказу ОАО «ОКБМ Африкантов» в научных организациях РФ. В частности, совместно с кафедрой гидроаэродинамики С.- Петербургского технического университета выполнены расчетные и экспериментальные исследования процессов естественной конвекции воздуха вблизи вертикальной нагретой пластины. Отличительной особенностью этого эксперимента является возможность одновременного (в одном эксперименте) исследования всех режимов естественноконвективного течения от: ламинарного до развитого турбулентного, вплоть до значения числа Грасгофа $4.5 \cdot 10^{11}$ (рис. 6).

Численное моделирование эксперимента проводилось с использованием технологии зонального LES моделирования, которая позволила существенно сэкономить вычислительные ресурсы за счет RANS моделирования областей, где неприципиально сеточное разрешение конвективных вихревых структур (рис. 7). Размерность сеточной модели при этом составила 2,8 млн элементов.

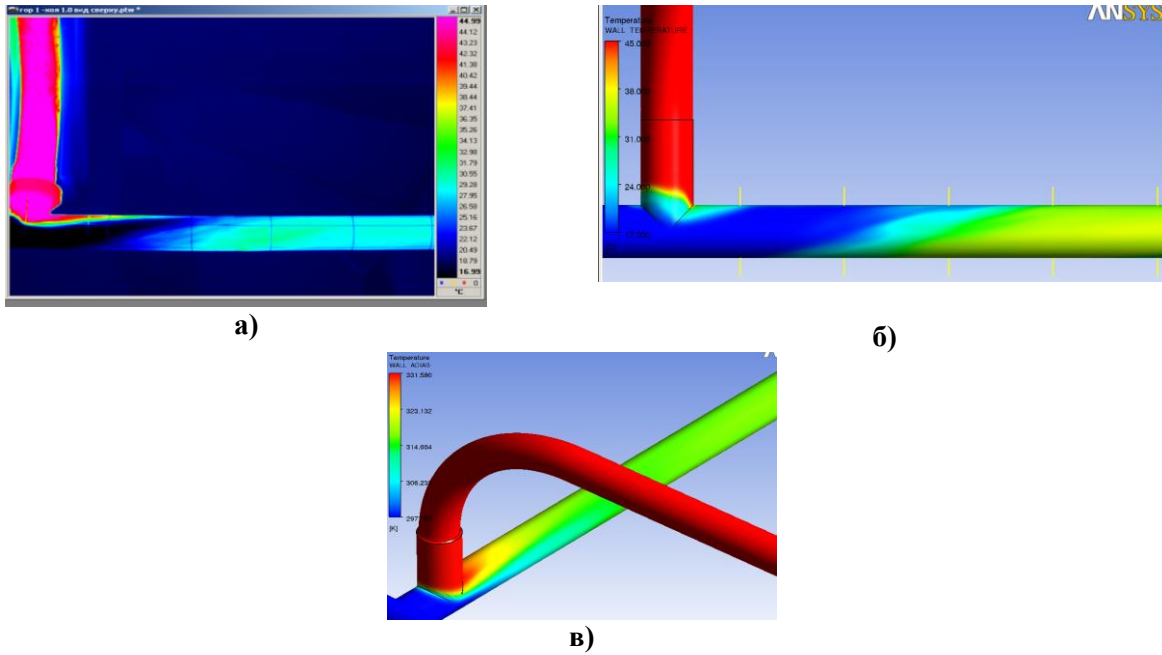


Рис. 5. Сравнение результатов расчета (RANS, LES) с экспериментом:
 а – эксперимент; б – расчет LES; в – расчет RANS

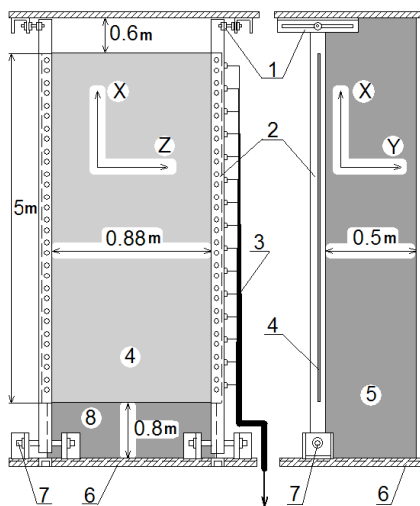


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

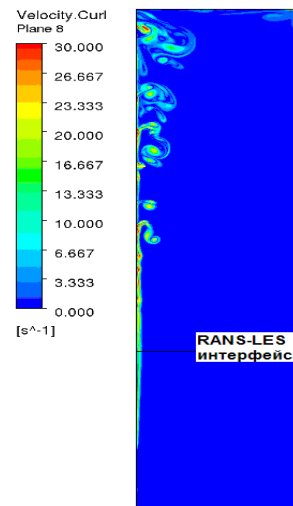


Рис. 7. Зарождение турбулентности на границе RANS – LES интерфейса и ее развитие в LES области

Большим преимуществом зонального LES моделирования является генерация статистических параметров RANS турбулентности на входе в LES область, тем самым обеспечивается возможность моделирования области перехода, в которой происходит генерация турбулентности.

Выполненные расчеты подтвердили, что только с использованием технологии зонального LES моделирования возможно моделирование представленного эксперимента.

Актуальной задачей атомной энергетики также является анализ процессов естественной конвекции в узких вертикальных щелевых зазорах (рис. 8), который по конструктивным особенностям соответствует единицам оборудования РУ – стойке ИМ СУЗ, узлу выхода охлаждающей воды и др. Отработка технологии расчетов данного типа конвективных течений в ОАО “ОКБМ Африкантов” проводится на экспериментальной модели щелевого зазора (рис. 8).

Нижнее основание кольцевого зазора непосредственно связано с объемом греющей среды (баком). На нижней поверхности бака поддерживается постоянная температура. Внутри внутренней трубы снизу вверх подается холодная вода.



Рис. 8. Экспериментальная установка

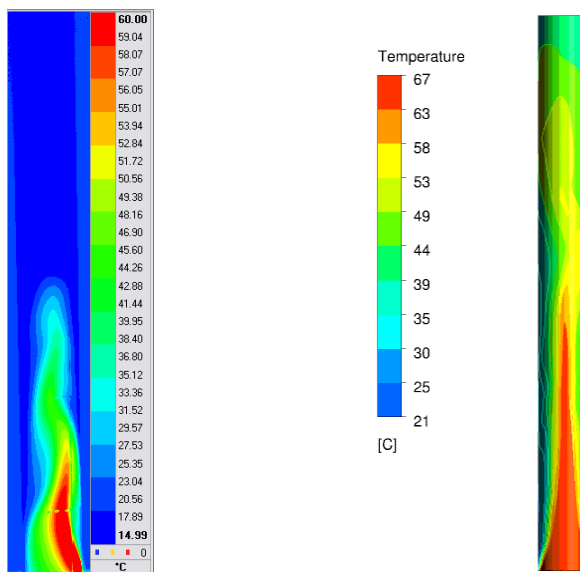


Рис. 9. Поле температур, полученное в эксперименте (слева), в расчете (справа)

В расчетах использовалась структурированная гексаэдрическая сетка размерностью около 6 млн элементов, при этом кольцевой зазор разбит на десять элементов по толщине. На рис. 9 представлены также поля температур на поверхности модели, полученные с использованием тепловизора и в результате расчета.

Отработка технологии расчетов стратифицированных течений проводилась на основе экспериментов по исследованию стратифицированных течений в наклонной трубе.

Экспериментальная установка стенда представляет собой сборку, состоящую из двух баков, соединенных между собой при помощи шаровых фланцев участком трубы прямоугольного сечения (рис. 10). Значения температур воды в баках во время эксперимента измеряется с помощью термодатчиков. Бак с горячей водой устанавливается на площадку подъемника, тем самым, благодаря установленным в баках шаровым фланцам, изменяя высоту установки рабочей площадки подъемника, изменяется угол наклона к горизонту исследуемого участка трубы.

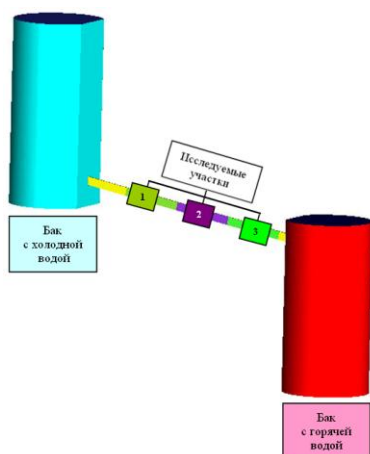


Рис. 10. Компьютерная модель стенда

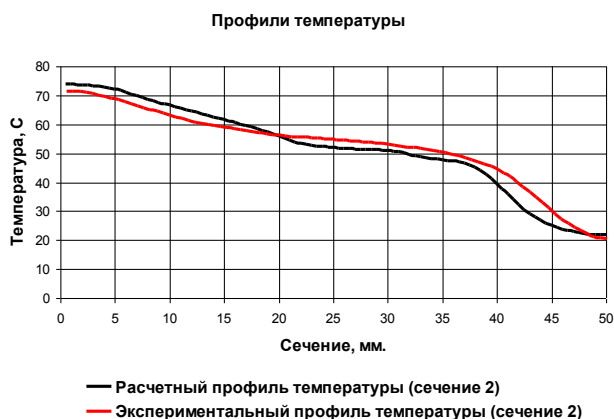


Рис. 11. Осредненные по времени экспериментальные и расчетные профили температур

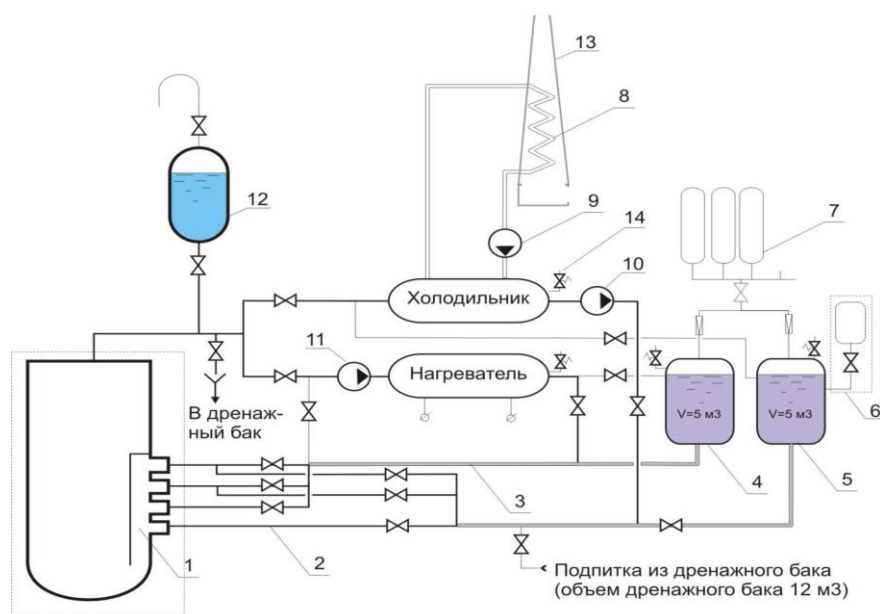
В эксперименте угол наклона трубы составляет 10° , температура холодной воды 18°C , температура горячей воды 82°C .

Сравнение экспериментальных и расчетных данных проведено по осредненным профилям температуры в сечениях. Видно, что в профиль температуры имеет выраженную “ступеньку” (рис. 11), довольно качественно предсказанную расчетом с использованием вихререзающих моделей турбулентности.

Логическим продолжением выполняемых верификационных исследований является создаваемый в Нижегородском техническом университете им. Р.А. Алексеева крупномасштабный стенд для исследования процессов смешения в реакторе.

Принципиальная схема стенда приведена на рис. 12. Создаваемый стенд позволит снять ограничения по величине масштабного фактора, присущие стендам и экспериментальным моделям гидродинамической лаборатории ОАО «ОКБМ Африкантов», и будет превосходить зарубежные аналоги. Измерения на стенде будут выполняться с использованием лазерных и тепловизионных методов, сеточных датчиков. Кроме того, предусмотрена возможность исследования на стенде влияния морской качки и статических наклонов на процессы смешения в реакторе, что представляет особую актуальность для установок транспортного назначения.

Схема стенда исследований смешения потоков



Характеристики стенда

Мощность нагревателя - 1.0 МВт
 Мощность холодильника - 1.0 МВт
 Максимальное давление - 1.0 МПа
 Максимальная температура - -160°C
 Диаметры основных трубопроводов горячей и холодной воды - 100 мм

Обозначения

1 - экспериментальная модель
 2 - контур холодной воды
 3 - контур горячей воды
 4 - сосуд с горячей водой
 5 - сосуд с холодной водой
 6 - система солеподготовки
 7 - система газа высокого давления (20 баллонов 40 л)
 8 - воздушный теплообменник
 9 - насос контура охлаждения (производительность 50 т/ч)
 10 - насос холодной воды (производительность 80 т/ч)
 11 - насос горячей воды (производительность 80 т/ч)
 12 - компенсатор давления (объем 1.2 м³)
 13 - тяговая труба контура воздушного охлаждения
 14 - предохранительный клапан

Рис. 12. Принципиальная схема стенда

Таким образом, в результате комплекса выполняемых в ОАО «ОКБМ Африкантов» расчетных и экспериментальных исследований получены конкретные результаты адаптации и верификации CFD к решению практических задач расчетного обоснования отдельных элементов конструкции и сложных режимов работы реакторных установок. Эти результаты подтверждают перспективность выбранного направления развития. В дальнейшем запланировано существенное расширение верификационных экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Пат. № 112409 «Устройство для измерения температурного поля газового или жидкостного потока», Патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов», 10.01.2012
2. Пат. № 126455 «Устройство для измерения температурного поля газового или жидкостного потока», Патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов», 10.07.2012

3. **Большухин, М.А.** Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике / М.А. Большухин [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. Т. 4, 5, октябрь – декабрь 2012. С. 469-481.
4. **Zboray, R.**, Manera A., Niceno B., Prasser H.-M.: Investigations on Mixing Phenomena in Single-phase Flows in a T-Junction Geometry. The 12th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12), Sheraton Station Square, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. September 30-October 4. 2007.
5. **Westin, J.** Thermal Mixing in a T-Junction. Model Tests at Vattenfall research and Development AB 2006. Boundary Conditions and List of Available Data for CFD-Validation, Report Memo U 07-26, Vattenfall R&D AB, Älvkarleby, Sweden. 2007.
6. **Prasser, H.-M.**, Grunwald, G. Höhne, T., Kliem, S., Rohde U., Weiss F.-P. Coolant mixing in a Pressurized Water Reactor: Deboration Transients, Steam-Line Breaks, and Emergency Core Cooling Injection, Nuclear Technology 143 (1). 2003. P. 37.
7. **Alavyoon, F.**, Hemström, B., Andersson, N. G., Karlsson; R. I.: Experimental and Computational Approach to Investigating Rapid Boron Dilution Transients in PWRs. CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College, PA, USA, October 18-20, (1995).

*Дата поступления
в редакцию 02.05.2013*

M.A. Bolshukhin, A.V. Budnikov, V.I. Fomichev, D.N. Sveshnikov, R.I. Romanov

PRESSING ISSUES OF EXPERIMENTAL DATABASE DEVELOPMENT TO VERIFY CFD CODES USED IN NUCLEAR POWER INDUSTRY

JSC “OKBM Afrikantov”

Purpose: Creation of experimental database, which can be used to verify CFD codes, is the binding requirement for their usage in nuclear power industry.

Design/ methodology/ approach: As the verification experiments, ones for flow mixing are analyzed, which are characterized by significant influence of buoyant forces due to the density difference of unevenly heated liquid, considered to be the most vital experiments for the nuclear power industry.

Findings: The paper presents short description of the carried out experiments and verification calculations performed on their basis, conclusion is drawn concerning specific results of CFD customization and verification to solve practical problems of justifying calculations for separate construction components and complicated modes of reactor plant operation.

Research limitations/implications: The present study is one of initial steps for providing a basis for CFD codes usage in nuclear power industry.

Key words: computational fluid dynamics, mixing, convection, cfd verification, scale-resolving simulations.