

УДК 004.94

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/162

*О.О. ШЕСТАК, О.В. ДЕНИСОВА, А.А. ДЕУЛИН***МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО БЕНЧМАРКА OECD/NEA «COLD LEG MIXING CFD-UQ» ПО ПАКЕТУ ПРОГРАММ «ЛОГОС»**

Представлены результаты моделирования по отечественному пакету программ «Логос» разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» международного бенчмарка OECD/NEA «Cold Leg Mixing CFD-UQ», посвященного исследованию смешения потоков различной плотности на экспериментальной установке, находящейся в Техасском А&М Университете (TAMU). Основная цель бенчмарка – анализ применимости CFD-методов к моделированию процессов перемешивания под влиянием сил плавучести в условиях теплового удара под давлением, что имеет большое значение с точки зрения ядерной безопасности. На основании расчетов открытого теста с известными экспериментальными данными отработаны подходы к моделированию, которые использованы для расчетов «слепого» теста. Выполнено качественное сравнение расчетных профилей с доступными экспериментальными данными по «слепому» тесту. Проведен анализ неопределенности для оценки влияния входных данных на результаты моделирования «слепого» теста.

Ключевые слова: бенчмарк OECD/NEA «Cold Leg Mixing CFD-UQ», пакет программ «Логос», вычислительная гидродинамика (CFD), анализ неопределенности (UQ).

Введение

Вычислительная гидродинамика (CFD) – это хорошо развитый современный численный инструмент, который используется в различных технических дисциплинах. Все большее распространение получает использование CFD-методов в атомной отрасли, особенно для моделирования ситуаций с существенными трехмерными эффектами, в которых традиционные отраслевые коды слабо применимы и неинформативны. Актуальность адаптации CFD-кодов для решения задач атомной энергетики подтверждается значительным объемом работ в данном направлении, координируемых Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Агентством по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития в Европе (OECD/NEA). Под эгидой OECD/NEA на регулярной основе организуются международные CFD-тесты атомной отрасли (бенчмарки), направленные на отработку методов применения CFD-кодов для актуальных задач отрасли с использованием представительной экспериментальной базы [1].

«Cold Leg Mixing CFD-UQ» – это пятый международный бенчмарк, организованный OECD/NEA в 2017 г. и продолжающийся по настоящее время. Основная цель бенчмарка – анализ применимости CFD-методов к моделированию процессов перемешивания под влиянием сил плавучести в условиях теплового удара под давлением (Pressurized Thermal Shock, PTS), имеющих большое значение с точки зрения ядерной безопасности. Бенчмарк посвящен моделированию экспериментов по исследованию смешения потоков различной плотности на установке, находящейся в Техасском А&М Университете (TAMU) [2].

На базе серии экспериментов организаторами бенчмарка сформулирован открытый тест, результаты которого были предоставлены участникам для отработки стратегии моделирования, а также «слепой» тест, экспериментальных данных по которому не предоставлялось. Целью «слепого» теста является анализ и оценка результатов моделирования, определенных организаторами и представленных участниками. В рамках бенчмарка «Cold Leg Mixing CFD-UQ» участникам было предложено также провести анализ неопределенностей. Наличие неопределенностей различных типов в таких сложных системах, как реакторные установки, оказывает существенное влияние на процесс моделирования, что приводит к высокой актуальности их анализа для учета и поиска путей устранения.

В бенчмарках OECD/NEA традиционно принимает участие широкий круг специалистов из разных стран, поскольку результаты таких тестов имеют большое значение для развития методов моделирования в атомной энергетике, публикуются и широко обсуждаются на международных семинарах и конференциях. Так, на участие в бенчмарке «Cold Leg Mixing CFD-UQ» подали заявки 36 команд из 11 стран и 22 организаций. Итоговые результаты представили 11 команд из 6 стран и 10 организаций, включая команду ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с расчетами по пакету программ «Логос». Только 5 команд, включая ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», провели анализ неопреде-

ленности при моделировании «слепого» теста. Отечественный многофункциональный пользовательский пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования «Логос» [3] разработан и активно развивается во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Одной из перспективных областей его применения является CFD-моделирование трехмерных задач тепломассопереноса в интересах решения задач атомной энергетики.

В работе представлены результаты расчетов международного бенчмарка OECD/NEA «Cold Leg Mixing CFD-UQ», выполненных по пакету программ «Логос». Приведено краткое описание экспериментальных исследований, описана процедура отработки подходов к моделированию на базе расчетов открытого теста, а также представлены результаты расчетов «слепого» теста. В настоящее время организаторами бенчмарка проводится анализ результатов участников и подготовка финального отчета. В работе [4] опубликована частичная предварительная экспериментальная информация, в том числе по «слепому» тесту, которая в данной работе использована для сравнения с результатами, полученными по пакету программ «Логос». Представлены также результаты анализа неопределенности входных данных для оценки их влияния на результаты моделирования.

Данная работа является первым опытом применения пакета программ «Логос» для моделирования международного бенчмарка. При этом необходимо отметить положительный опыт участия ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с расчетами по пакету программ «Логос» в первом российском отраслевом бенчмарке по исследованию турбулентной конвекции Рэлея – Бенара в прямоугольных полостях [5], организованном АО «ОКБМ Африкантов» в 2018 г.

1. Описание экспериментальной установки. Методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка, состоящая из двух цилиндрических резервуаров, соединенных горизонтальной круглой трубой с задвижкой, находится в Техасском А&М Университете [2], [4]. Схема установки представлена на рис. 1.

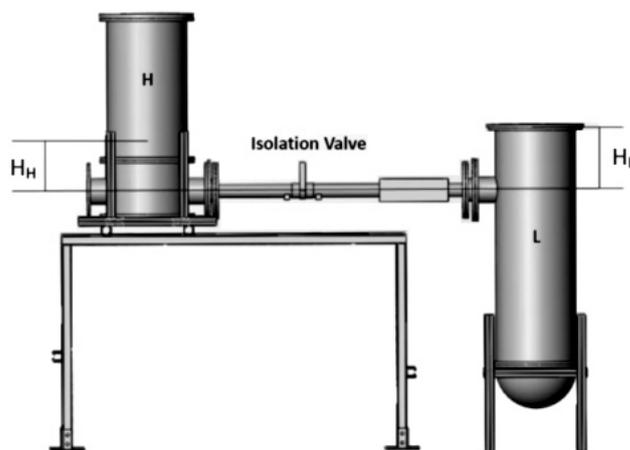


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В экспериментах моделируется сценарий, при котором наблюдается перемешивание холодного и горячего теплоносителя в горизонтальной холодной нитке циркуляционного контура реактора. С точки зрения безопасности важна ситуация, когда холодный теплоноситель поступает в сосуд под давлением, при этом тепловые напряжения могут вызвать развитие процесса образования трещин, что может привести к нарушению целостности корпуса реактора.

Геометрия экспериментальной установки близко повторяет холодную нитку и опускной участок реактора (в масштабе 1:10). Эксперименты проводятся в изотермических условиях: используются рабочие жидкости, разница плотностей которых примерно соответствует реальным условиям. В качестве легкой жидкости применяется вода с этанолом, в качестве тяжелой – вода с солью.

Правый резервуар представляет собой сосуд под давлением, моделирующий опускной участок реактора. Он закрыт сверху и в начале эксперимента заполнен легкой жидкостью. В левом резервуаре с тяжелой жидкостью, моделирующем бак системы аварийного охлаждения, выставлен уровень, обеспечивающий равенство гидростатического давления слева и справа от задвижки, расположенной на горизонтальной трубе, соединяющей резервуары. В начале эксперимента задвижка открывается, позволяя жидкостям смешаться.

При проведении экспериментов, соответствующих открытому и «слепому» тестам, используются аналогичные методики. Отличие состоит в свойствах рабочих жидкостей (и уровне тяжелой жидкости). В открытом тесте разница плотностей жидкостей составляет 100 кг/м^3 , в «слепом» – 200 кг/м^3 .

Резервуары и труба изготовлены из прозрачного акрила для обеспечения возможности визуализации потоков в процессе проведения эксперимента. Измерения проводятся в горизонтальной трубе (одновременное измерение скоростей методом PIV и концентраций методом LIF) и в опускном участке (измерение скоростей методом PIV).

2. Расчеты открытого теста. Отработка подходов к моделированию

Стандартной практикой при расчете бенчмарков является использование экспериментальных данных открытого теста для выбора стратегии моделирования. Это длительное трудоемкое численное исследование, требующее проведения большой серии расчетов с детальным анализом результатов. Для открытого теста организаторами были предоставлены экспериментальные профили компонент скорости вдоль опорных линий в горизонтальной трубе и в опускном участке, которые были использованы для сравнения с результатами моделирования по пакету программ «Логос».

Сравнительный анализ расчетов, выполненных с использованием различных подходов к моделированию турбулентности (ламинарная постановка, учет турбулентности по RANS- и LES-моделям), показал (рис. 2):

- наиболее близкие к эксперименту результаты получены в расчетах в ламинарной постановке и с учетом турбулентности по модели LES;
- LES более близок к эксперименту в опускном участке, чем ламинарная постановка;
- профили, полученные в RANS-постановке (использовалась модель SST), имеют существенные качественные расхождения с экспериментом.

Таким образом, для моделирования турбулентности в качестве базовой выбрана модель LES.

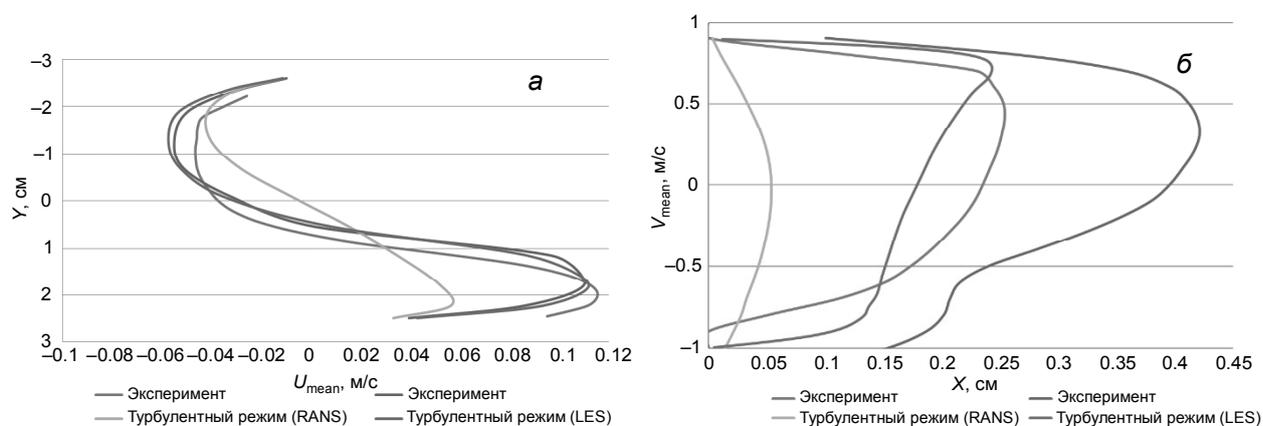


Рис. 2. Открытый тест, профили скорости (тестовая модель 3.5 млн ячеек): а – в горизонтальной трубе (продольная компонента, интервал осреднения 6–16 с); б – в опускном участке (вертикальная компонента, интервал осреднения 10–20 с)

Отдельное внимание было уделено способу моделирования открытого резервуара с тяжелой жидкостью. Рассмотрение различных вариантов постановки граничных условий в окрестности свободной поверхности позволило выбрать оптимальный с точки зрения точности и скорости счета метод VOF.

В ходе отработки подходов к моделированию были исследованы расчетные сетки различной структуры: блочные и преимущественно шестигранные с призматическими слоями, для построения которых использованы сеточные генераторы «Логос-Препост». В областях наибольшего интереса (участок смешения горизонтальной трубы и опускной участок) все расчетные сетки локально измельчались. Наилучшие результаты были получены на преимущественно шестигранных сетках с призматическими слоями.

Анализ сеточной сходимости был выполнен на преимущественно шестигранных сетках с призматическими слоями, содержащих 8, 12 и 20 млн ячеек. Измельчение сетки от 8 до 12 млн ячеек позволило улучшить согласие расчетных профилей с экспериментальными. Использование

сетки размерностью 20 млн ячеек не дало существенных изменений профилей по сравнению с сеткой, содержащей 12 млн ячеек. На рис. 3 показаны профили скорости, полученные на сетке размерностью 12 млн ячеек.

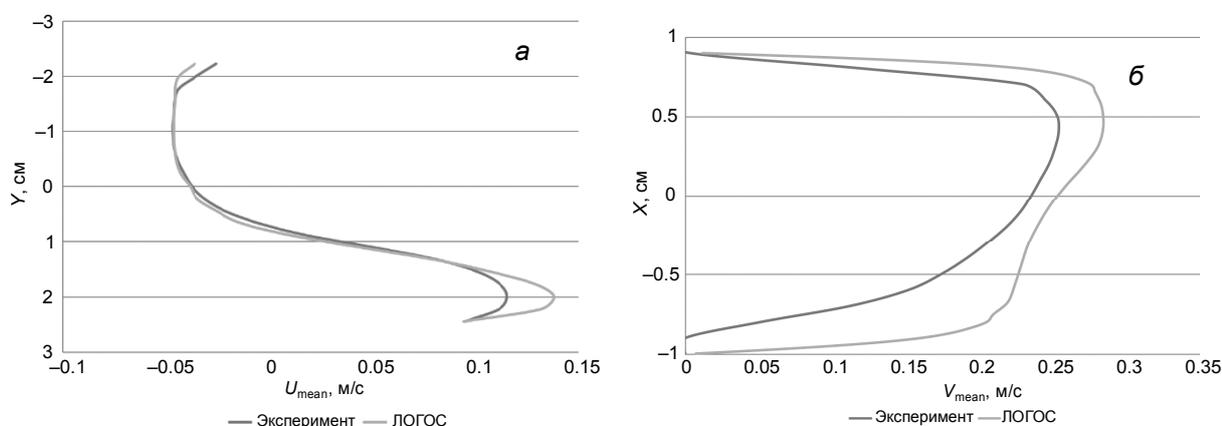


Рис. 3. Открытый тест, профили скорости (результатирующая модель 12 млн ячеек): а – в горизонтальной трубе (продольная компонента, интервал осреднения 6–16 с); б – в опускном участке (вертикальная компонента, интервал осреднения 10–20 с)

Таким образом, в результирующем расчете открытого теста:

- достигнуто существенное улучшение профиля продольной компоненты скорости в горизонтальной трубе по сравнению с тестовой моделью (рис. 2 и 3): получена качественно верная форма профиля, хорошо предсказано положение точки перегиба, соответствующее нулевой скорости на границе между двумя слоями жидкости, что подтверждает правильность моделирования стратификации;
- в горизонтальной трубе наблюдается близкое совпадение с экспериментом величины скорости легкой жидкости при завышении величины скорости тяжелой жидкости;
- достигнуто лучшее качественное согласие с экспериментом профиля вертикальной компоненты скорости в опускном участке по сравнению с тестовой моделью (рис. 2 и 3), при этом наблюдается расхождение формы профиля (в эксперименте он более гладкий) и некоторое завышение величины скорости, что может быть следствием завышения скорости тяжелой жидкости в горизонтальной трубе.

Одним из возможных путей дальнейшего улучшения результатов моделирования является калибровка констант модели LES и используемых схем аппроксимации, однако в силу ограниченности временных сроков (с учетом необходимости проведения анализа неопределенностей в «слепом» тесте) это не было выполнено и остается задачей на перспективу.

По результатам расчетов открытого теста для последующих расчетов «слепого» теста была выбрана следующая стратегия:

- преимущественно шестигранная расчетная сетка с призматическими слоями, содержащая 12 млн ячеек;
- метод VOF для моделирования свободного уровня тяжелой жидкости;
- модель LES для учета турбулентности.

3. Результаты расчетов «слепого» теста

На рис. 4 и 5 для иллюстрации приведены средние по времени поля скорости и концентрации тяжелой жидкости на интервале осреднения 10–15 с.

Ключевыми результатами «слепого» теста являются профили компонент скорости в горизонтальной трубе и опускном участке, а также профили концентрации тяжелой жидкости в горизонтальной трубе, осредненные на последовательных пятисекундных временных интервалах, определенных организаторами бенчмарка.



Рис. 4. «Слепой» тест, средняя скорость (интервал осреднения 10–15 с)



Рис. 5. «Слепой» тест, средняя концентрация тяжелой жидкости (интервал осреднения 10–15 с)

В работе [4] представлены экспериментальные профили компонент скорости в горизонтальной трубе и опускном участке, однако границы интервалов осреднения не совпадают с заявленными в бенчмарке. На рис. 6 и 7 приведены расчетные и экспериментальные профили с целью их качественного сравнения и общего анализа.

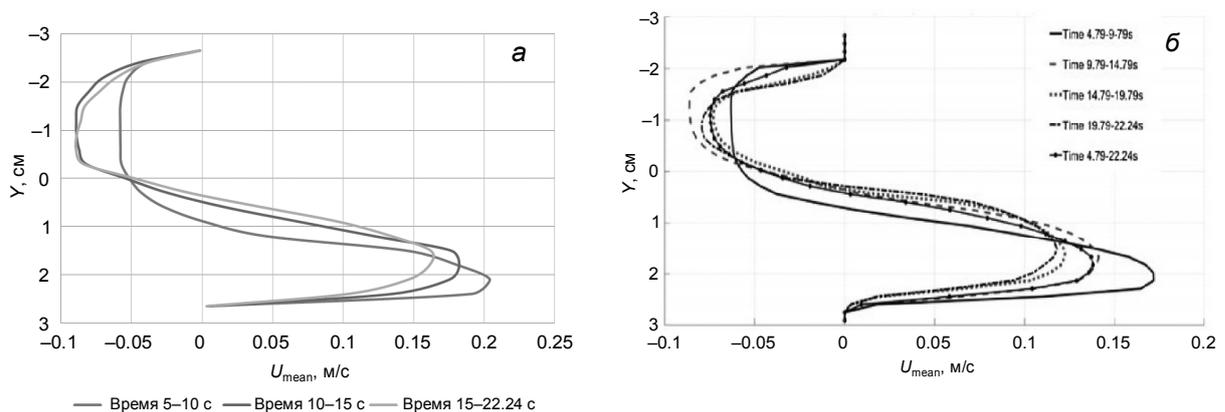


Рис. 6. «Слепой» тест, профили продольной компоненты скорости в горизонтальной трубе: а – «Логос»; б – эксперимент [4]

Анализ профилей продольной компоненты скорости в горизонтальной трубе, представленных на рис. 6, позволяет сделать следующие выводы:

– в расчете наблюдается согласующаяся с экспериментом динамика поведения скорости – с течением времени скорость тяжелой жидкости уменьшается, а скорость легкой сначала возрастает, а после 10 с мало меняется;

- расчетная скорость легкой жидкости хорошо согласуется с экспериментом, тогда как скорость тяжелой в расчете завышается (как и в открытом тесте);
- наблюдается схожая форма профилей, в расчете удовлетворительно предсказано положение точек перегиба на различных интервалах осреднения.

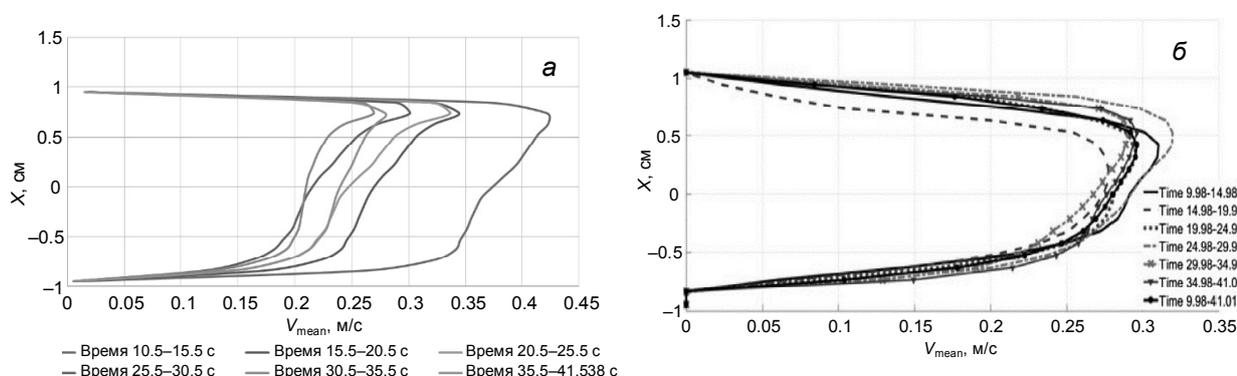


Рис. 7. «Слепой» тест, профили вертикальной компоненты скорости в опускном участке: *а* – «Логос»; *б* – эксперимент [4]

Анализ профилей вертикальной компоненты скорости в опускном участке, представленных на рис. 7, позволяет сделать следующие выводы:

- и расчетные, и экспериментальные профили показывают наличие более высокой скорости у внутренней стенки, однако экспериментальные профили в целом имеют более гладкую форму, как и в открытом тесте;
- расчетные профили демонстрируют более высокое значение скорости на первом интервале по сравнению с экспериментом (что может быть следствием завышения скорости тяжелой жидкости) и при этом более выраженное снижение скорости со временем, в отличие от экспериментальных профилей, однако на финальных интервалах в расчете, как и в эксперименте, наблюдается повторное увеличение скорости, что подтверждает правильную динамику процесса.

На рис. 8 представлены расчетные профили концентрации тяжелой жидкости, полученные при моделировании «слепого» теста по пакету программ «Логос».

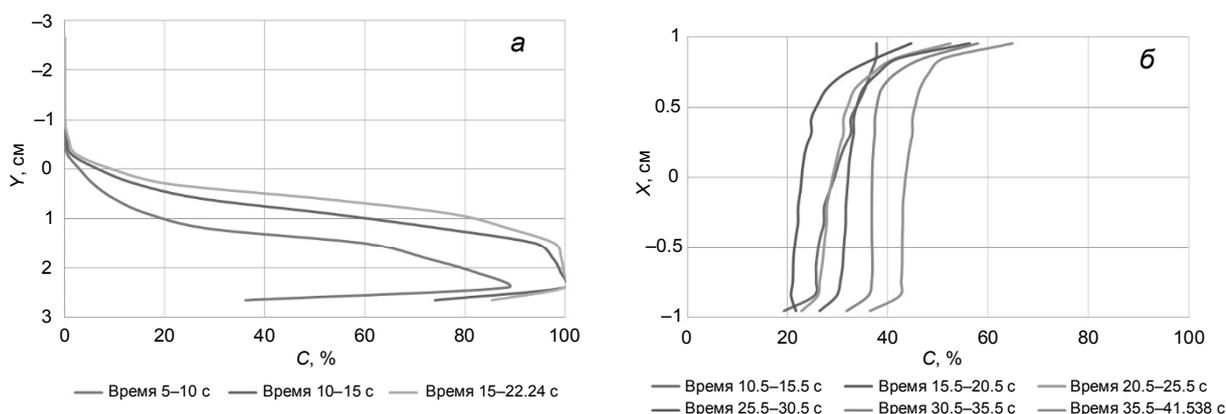


Рис. 8. «Слепой» тест, расчетные профили концентрации тяжелой жидкости: *а* – в горизонтальной трубе; *б* – в опускном участке

4. Анализ неопределенности входных данных

Анализ неопределенностей (Uncertainty Quantification, UQ) в математическом моделировании лишь относительно недавно (в начале 90-х гг. XX в.) стал предметом систематических исследований применительно к атомной энергетике в попытке найти обоснованные методы учета неполноты знаний. Ряд подходов к анализу неопределенностей изложен в обзоре OECD/NEA [6] и в стандарте Американского общества инженеров-механиков ASME [7]. К настоящему времени накоплен определенный опыт проведения анализа неопределенностей для теплогидравлических расчетов с ис-

пользованием отраслевых интегральных кодов, модели в которых построены на основе законов сохранения, а априорная информация используется в замыкающих соотношениях. Распространение опыта теплогидравлических кодов на CFD-коды – очень важная и наукоемкая задача. Это связано, в частности, с повышением количества рассматриваемых источников возникновения неопределенностей и с отсутствием принципиальной возможности проведения необходимого (по факту очень большого) количества трехмерных расчетов, требующих несравнимо больших временных и вычислительных затрат относительно теплогидравлических кодов.

Согласно [6, 7], источники неопределенностей в численных расчетах можно отнести к одному из трех основных типов.

В качестве первого источника рассматриваются неопределенности численного моделирования: математических моделей, а также используемых подходов и допущений при создании расчетных моделей (численные неопределенности пространственной и временной дискретизации, итерационных процедур, неопределенность эмпирических коэффициентов и т.п.).

Второй источник неопределенностей связан с недостаточностью знаний о начальных и граничных условиях, физико-химических свойствах веществ, геометрических размерах, неполнотой информации о механизмах протекания процессов и др., т.е. с исходными данными для моделирования.

Третий источник неопределенностей заключается в используемых физических моделях, которые могут иметь существенные отличия от результатов экспериментальных наблюдений.

Наилучшего согласия с экспериментами не всегда можно достичь путем усовершенствования схем дискретизации, повышения качества сетки и т.д. Признавая, что некоторые исходные данные являются неопределенными параметрами с вероятностным распределением, необходимо определить уровень неопределенности, которую эти переменные вносят в численные расчеты.

В 2015–2016 гг. OECD/NEA был проведен первый бенчмарк, включающий в себя анализ неопределенностей, посвященный моделированию экспериментов по турбулентному смешению потоков на установке GEMIX [1]. В рамках бенчмарка предлагалось оценить влияние таких источников неопределенностей как граничные условия и модели турбулентности. Для текущего бенчмарка «Cold Leg Mixing CFD-UQ» участникам было предложено самостоятельно определить источники неопределенностей и провести их анализ.

В рамках данной работы был выполнен анализ неопределенности входных данных – проведена оценка влияния значений плотности легкой и тяжелой жидкостей на результаты моделирования «слепого» теста. Были использованы экспериментально измеренные значения плотности со статистическими характеристиками (средним и стандартным отклонениями), предоставленные организаторами в качестве исходных данных. Для анализа неопределенности был выбран метод детерминированной выборки [6], в котором рассматриваются три статистических момента – среднее, дисперсия и стандартное отклонение:

$$\text{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i = \bar{q}; \quad (1)$$

$$\text{var} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2; \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\text{var}}. \quad (3)$$

Параметр q – плотность тяжелой и легкой жидкостей – варьируется следующим образом:

$$q_1 = \bar{q} + \sqrt{3} \cdot \sigma; \quad (4)$$

$$q_2 = \bar{q}; \quad (5)$$

$$q_3 = \bar{q} - \sqrt{3} \cdot \sigma. \quad (6)$$

Здесь \bar{q} – среднее значение, а σ – стандартное отклонение плотности тяжелой и легкой жидкостей, представленные организаторами бенчмарка.

В соответствии с принятым методом была составлена матрица, включающая в себя девять расчетов, в которых проводилось варьирование плотности. По результатам расчетов определены среднее, дисперсия, стандартное отклонение, а также верхняя и нижняя полосы ошибок согласно формулам

$$UEB = \bar{q} + 2 \cdot \sigma; \quad (7)$$

$$LEB = \bar{q} - 2 \cdot \sigma. \quad (8)$$

На рис. 9 представлены профили скорости с верхними (UEB) и нижними (LEB) полосами ошибок. Рисунок демонстрирует существенное влияние вариаций плотности рабочих жидкостей на результаты моделирования, при этом необходимо отметить, что заявленные стандартные отклонения плотностей рабочих жидкостей не превышают 1% от средних значений.

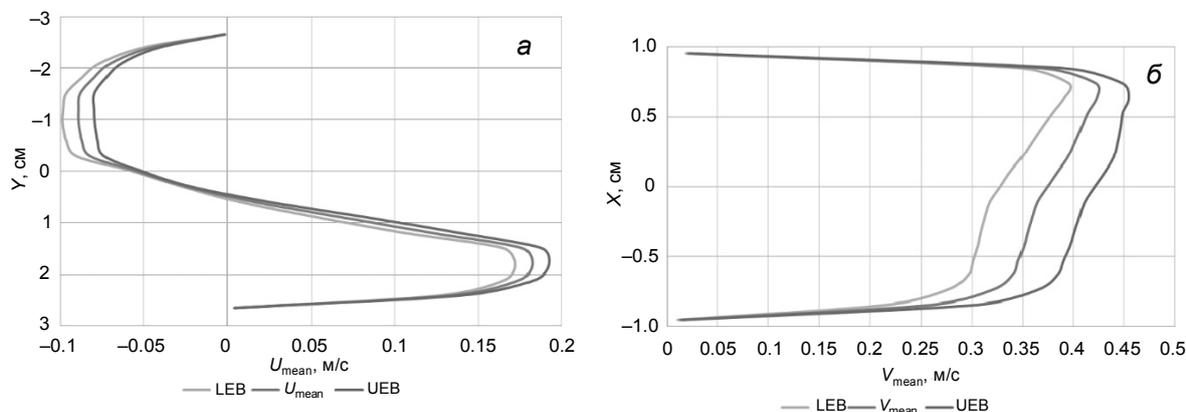


Рис. 9. «Слепой» тест, профили скорости с полосами ошибок: *a* – в горизонтальной трубе (продольная компонента, интервал осреднения 10–15 с); *б* – в опускном участке (вертикальная компонента, интервал осреднения 10–15 с)

Заключение

В работе представлены результаты моделирования по пакету программ «Логос» пятого международного бенчмарка OECD/NEA «Cold Leg Mixing CFD-UQ», проводимого в настоящее время с целью анализа применимости CFD-методов к моделированию процессов перемешивания под влиянием сил плавучести в условиях теплового удара под давлением. Это первый опыт применения отечественного пакета программ «Логос» разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в качестве CFD-кода для моделирования международного бенчмарка атомной отрасли. В настоящее время организаторами бенчмарка проводится анализ результатов участников и подготовка финального отчета.

В ходе работы на основании расчетов открытого теста отработаны подходы к моделированию и выбрана следующая стратегия для последующих расчетов «слепого» теста: преимущественно шестигранная расчетная сетка с призматическими слоями размерностью 12 млн ячеек, метод VOF для моделирования свободного уровня тяжелой жидкости, модель LES для учета турбулентности.

Для анализа результатов моделирования «слепого» теста выполнено качественное сравнение расчетных профилей с доступными экспериментальными данными. Продемонстрировано удовлетворительное согласие расчетных данных с экспериментальными по форме профилей скорости в горизонтальной трубе, включая положение границы между двумя слоями жидкости, что подтверждает правильность моделирования стратификации. В расчетах наблюдается близкая к эксперименту скорость легкой жидкости при завышении скорости тяжелой жидкости, которая, в свою очередь, оказывает влияние на картину в опускном участке, где расчет отражает правильную общую динамику и положение максимумов, но демонстрирует расхождения по форме профилей и по величине расхода.

Поскольку одной из целей бенчмарка является проведение анализа неопределенностей, то для «слепого» теста с применением метода детерминированной выборки был выполнен анализ неопределенности входных данных, а именно проведена оценка влияния значений плотности рабочих жидкостей на результаты моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CFD benchmarks [Электронный ресурс]: Официальный сайт OECD/NEA. – Режим доступа: <https://oecd-nea.org/nsd/csni/cfd/>
2. COLD LEG MIXING CFD-UQ BENCHMARK [Электронный ресурс]: Сайт Техасского А&М Университета. – Режим доступа: <http://thrlab.tamu.edu/pressurized-thermal-shock-pts-facility-the-cold-leg-mixing-cfd-uq-benchmark/>

3. Программный комплекс ЛОГОС. Техническое руководство. – РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2019.
4. Orea D., Vaghetto R., Nguyen T., and Hassan Y. // Ann. Nucl. Energy. – 2019. – V. 140. – P. 107–137.
5. Шестак О.О., Деулин А.А., Денисова О.В. и др. // Сб. материалов науч.-практич. конф. «Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019». – Нижний Новгород, 2019.
6. Review of Uncertainty Methods for Computational Fluid Dynamics Application to Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NEA/CSNI/R(2016)4.
7. V&V20-2009. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. American Society of Mechanical Engineers, 2009. www.asme.org.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

Шестак Олег Олегович, мл. науч. сотр. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», e-mail: shestak_oleg92@mail.ru;
Денисова Оксана Владимировна, начальник науч.-исслед. группы ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», e-mail: ok.denisova@yandex.ru;
Деулин Андрей Александрович, начальник науч.-исслед. отдела ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», e-mail: drunix@mail.ru.

O.O. SHESTAK, O.V. DENISOVA, A.A. DEULIN

SIMULATION THE OECD/NEA INTERNATIONAL «COLD LEG MIXING CFD-UQ» BENCHMARK BY THE LOGOS SOFTWARE PACKAGE

The paper presents the results of simulation by the domestic software package Logos developed by FSUE «RFNC-VNIIEF» international OECD/NEA «Cold Leg Mixing CFD-UQ» benchmark dedicated to the study of mixing phenomena in the presence of density gradients at the experimental facility located at Texas A&M University (TAMU). The main objective of the benchmark is to analyze the applicability of CFD methods to simulation mixing processes with the influence of buoyancy forces under Pressure Thermal Shock event, which is of great importance from the point of view of nuclear safety. Based on the calculations of an open test with known experimental data, approaches to modeling have been worked out, which are used to calculate the «blind» test. A qualitative comparison of the calculated profiles with the available experimental data of the «blind» test is carried out. An uncertainty analysis was carried out to assess the influence of input data on the results of modeling a «blind» test.

Keywords: *OECD/NEA «Cold Leg Mixing CFD-UQ» benchmark, Logos software package, Computational Fluid Dynamics (CFD), Uncertainty Quantification (UQ).*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov, Russia

Shestak Oleg Olegovich, Junior Researcher FSUE «RFNC-VNIIEF», e-mail: shestak_oleg92@mail.ru;
Denisova Oksana Vladimirovna, Team Lead FSUE «RFNC-VNIIEF», e-mail: ok.denisova@yandex.ru;
Deulin Andrey Aleksandrovich, Head of Research Department FSUE «RFNC-VNIIEF», e-mail: drunix@mail.ru.