

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНО-ОДНОМЕРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГИДРАВЛИКИ В РУ ВВЭР

Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А, Кудрявцев О.Н, Надинский Ю.Н., Скибин А.П.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Россия

Введение

С увеличением расчетных мощностей и повышением требований к расчетному обоснованию РУ в мире активно ведется развитие имеющихся теплогидравлических кодов. Одним из основных направлений является учет пространственных явлений. В связи с этим требуется переход к трехмерному описанию расчетной области. Более качественная детализация расчетной области в свою очередь ведет к увеличению размерности расчетных сеток. Данное описание расчетной области может дать более подробное представление результатов расчета.

Так в качестве примера, одна из наиболее подробных гидравлических моделей для РУ ВВЭР представлена в методике «мультимасштабного моделирования» и была применена при моделировании РУ ВВЭР-1000 в программном комплексе ATHLET [1,2].

Однако с увеличением количества расчетных ячеек требуется большее количество замыкающих соотношений и коэффициентов. При этом количество экспериментальных данных и обобщений [3] в общем виде в гидравлическом приближении не позволяет для всех соседних узлов (нодов) поставить в соответствие уравнение для связи давления и перепада давления.

На данный момент CFD моделирование является единственным расчетным инструментом, с помощью которого можно получить достоверные пространственные распределения теплогидравлических параметров полноразмерного объекта исследования. Дальнейшая обработка результатов CFD расчета позволяет определить замыкающие коэффициенты для пространственной теплогидравлической модели. В качестве примера в работе [4] обработанные CFD результаты использованы в качестве исходных данных для гидравлического расчета.

Таким образом, сопряжение CFD с системными теплогидравлическими кодами для учета пространственных особенностей течения теплоносителя в РУ, в том числе и в активной зоне реактора, является актуальной проблемой ядерной энергетики.

Методика расчета пространственной гидравлики в РУ ВВЭР

Методика расчета пространственных течений основана на обработке результатов CFD моделирования.

В качестве исходных данных для гидравлического расчета требуются поля скорости (расходов) и давления. Для получения этих исходных данных требуется проведение CFD расчета. Для получения замыкающих соотношений для локально-одномерного гидравлического кода разработана специальная процедура осреднения результатов CFD моделирования.

В качестве примера в статье приведены две тестовые задачи:

1. Течение в каверне.
2. Моделирование смешения потоков с разной температурой в напорной камере реактора РУ ВВЭР для режима работы на двух смежных петлях.

Каверна

В качестве тестовой задачи рассмотрено течение жидкости в квадратной полости- каверне. В качестве референсного решения было использовано решение задачи при помощи CFD, после чего из полученных трехмерных полей давления и скоростей определяются коэффициент гидравлического сопротивления для связей и источники в узлах для эквивалентной гидравлической сети.

Рассмотрена задача течения жидкости в квадратной каверне с движущейся верхней стенкой [4]. Из решения данной задачи были взяты все необходимые данные для гидравлического расчета.

Сетка, на которой проводилось решение CFD задачи, представлено на рис. 1а. На рисунке 1б представлена нодализационная модель с нанесенными узлами для гидравлического расчета. Гидравлическая модель, соответствующая нодализационной модели, представлена на рисунке 1в.

Результаты CFD расчета представлены на рисунке 2а и 2б. На данных рисунках представлены поля скорости и градиента давления соответственно. Для получения исходных данных для гидравлического расчета были проинтегрированы поля скорости и давления. Далее в соответствии с уравнением Дарси-Вейсбаха были получены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) для связей гидравлической модели. Эти коэффициенты использовались для гидравлической задачи в качестве исходных данных. Для примерно 50% связей гидравлической модели значения КГС являются отрицательными. Это связано с тем, что для части нодов градиент давления сонаправлен скорости, что требует даже для воспроизведения результатов разработки специальной методики, основанной на введении компенсационных источников.

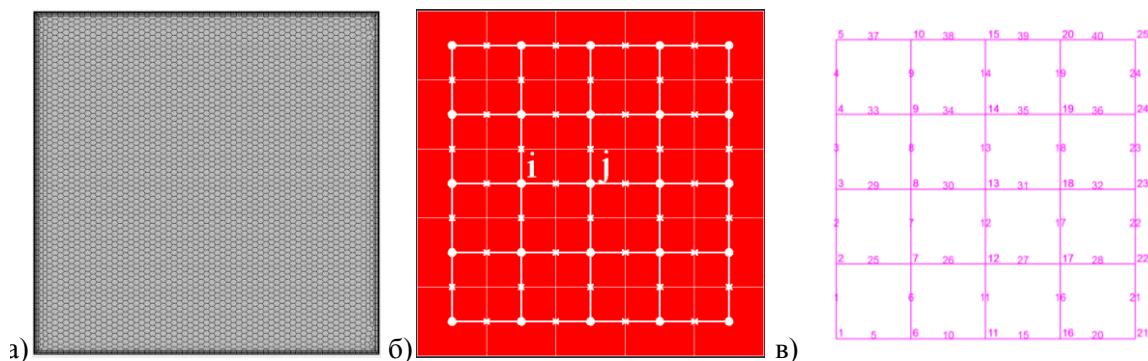


Рис. 1. Расчетные модели:

а) CFD сетка; б) Нодализационная модель; в) Гидравлическая модель

По полученным КГС был проведен гидравлический расчет. Сравнение с проинтегрированными результатами CFD расчета показывает, что погрешность восстановления поля расходов- $9.7 \cdot 10^{-7}\%$, погрешность восстановления поля давления- $6.4 \cdot 10^{-6}\%$. Поле скорости, полученное с помощью гидравлического расчета и переинтерполированное на расчетные узлы (ноды), представлено на рисунке 2в.

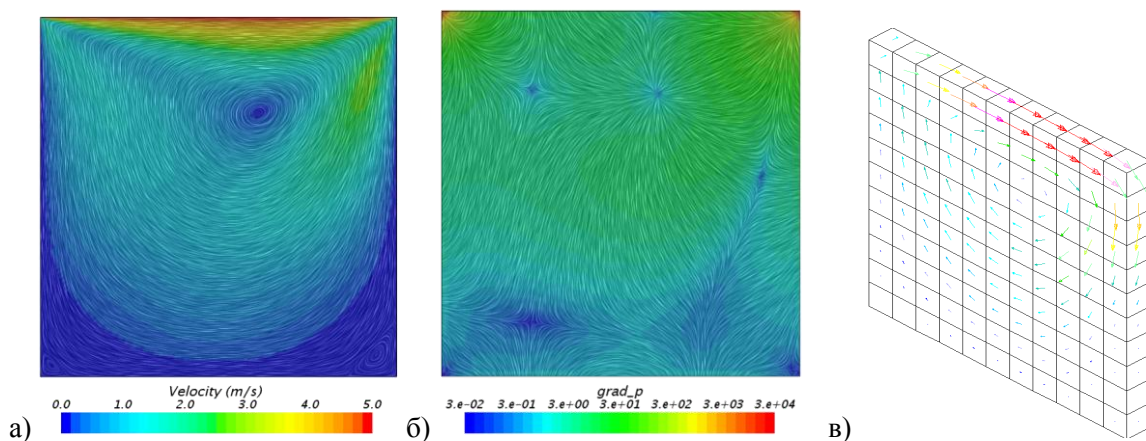


Рис. 2. Результаты расчета:

а) Скорости; б) Градиент давления; в) результаты гидравлического расчета

Напорная камера РУ ВВЭР

В настоящей работе в качестве примера применения локально-одномерных методов расчета рассмотрено моделирование смешения потоков с разной температурой в напорной камере реактора РУ ВВЭР для режима работы на двух смежных петлях.

Напорная камера реактора образована входными патрубками, кольцевым зазором между внутренней поверхностью корпуса реактора и наружной поверхностью шахты внутрикорпусной (ШВК), а также включает область прохода теплоносителя через перфорацию днища ШВК и последующее поступление в отверстия опор тепловыделяющих сборок. CFD модель также учитывает другие конструктивные элементы, например, образцы свидетели и кронштейны. Геометрия проточного тракта напорной камеры РУ с ВВЭР для CFD расчета представлена на рисунке 3.

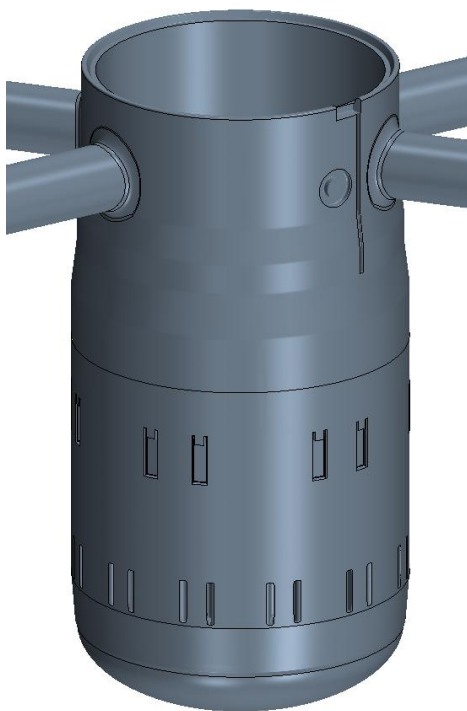
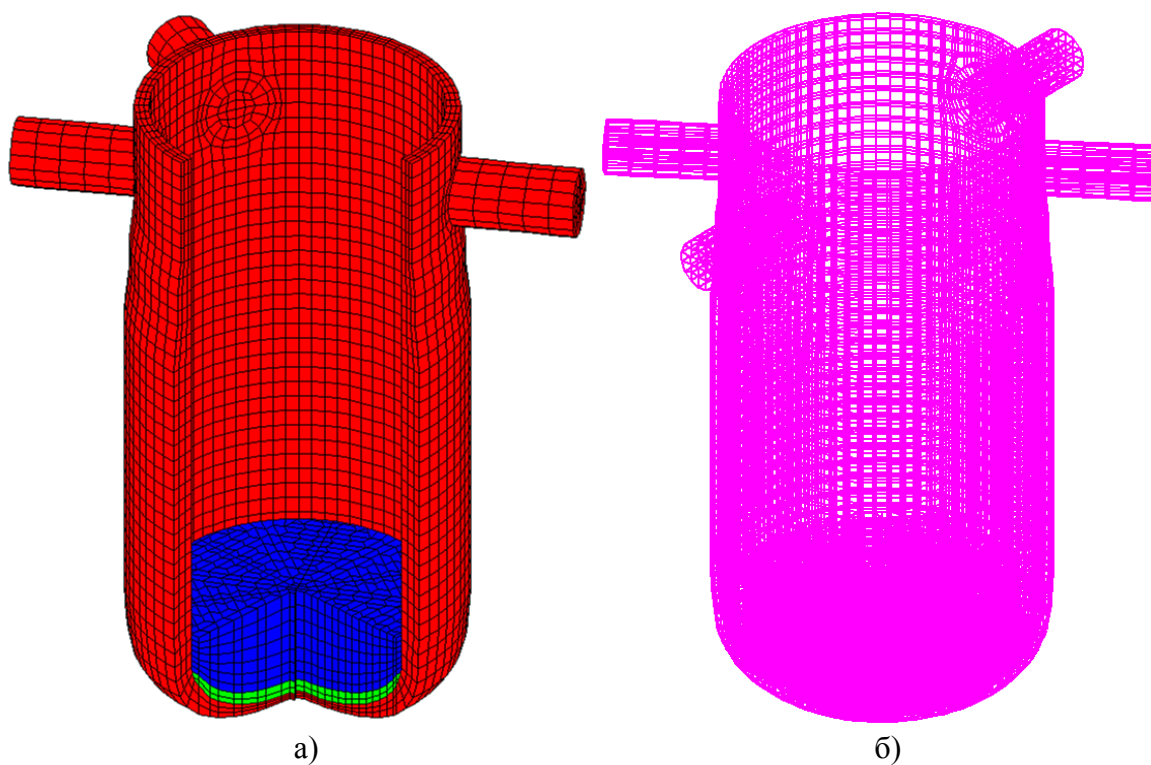


Рис. 3. Проточный тракт РУ ВВЭР

Данная проточная часть была использована для создания CFD и гидравлической моделей. Таким образом, CFD и локально-одномерная модели строго согласуются с CAD моделью. Размер сетки CFD модели составил ~300 млн. контрольных объемов. Более подробно описание CFD модели представлено в [5].

Проведен CFD расчет режима работы РУ на 2 петлях из четырех, а в двух других патрубках задан обратный ток. В патрубки подается теплоноситель с разной температурой. В результате моделирования получены распределения температуры, компонент вектора скорости и давления теплоносителя в проточном тракте.

Разработанная гидравлическая модель представляет собой сетку узлов, отражающая основную геометрию проточной части с некоторыми упрощениями. Размерность сетки узлов составила ~15 тысяч контрольных объемов. Детализация гидравлической модели сильно уступает подробности CFD модели. Сетка узлов гидравлической модели представлена на рисунке 4а. Гидравлическая модель, представляющая совокупность связей между центрами узлов (нодов), представлена на рисунке 4б.



*Рис. 4. Разработанная модель:
а) нодализационная; б) гидравлическая*

Результаты CFD расчета были проинтегрированы по каждому ноду и по каждой грани нода нодализационной модели. Результаты осреднения поля скорости на нодальной модели представлены на рисунке 5а. Результаты интегрирования полей скорости и давления были использованы в качестве референсных значений. Из них в свою очередь были получены замыкающие соотношения (коэффициенты гидравлического сопротивления и компенсационные источники) для каждой гидравлической связи. При этом все особенности CAD модели были учтены заданием реальных технических параметров, таких как длины связи и проходные сечения.

Анализ обработки результатов CFD расчета показал наличие в гидравлической модели связей с отрицательными значениями КГС. Также как и в тестовой задаче с каверной, это связано с тем, что для части соседних нодов градиент давления сонаправлен скорости через грань между ними.

С учетом разработанной методики расчета пространственных течений с помощью локально-одномерного гидравлического кода проведен расчет гидродинамики и теплообмена теплоносителя в напорной камере РУ с ВВЭР. Результаты расчета поля скорости представлены на рисунке 5б. Относительные отклонения полученных значений давления в нодах и расходов через грани нодов от результатов CFD расчета не превысило 0,001%.

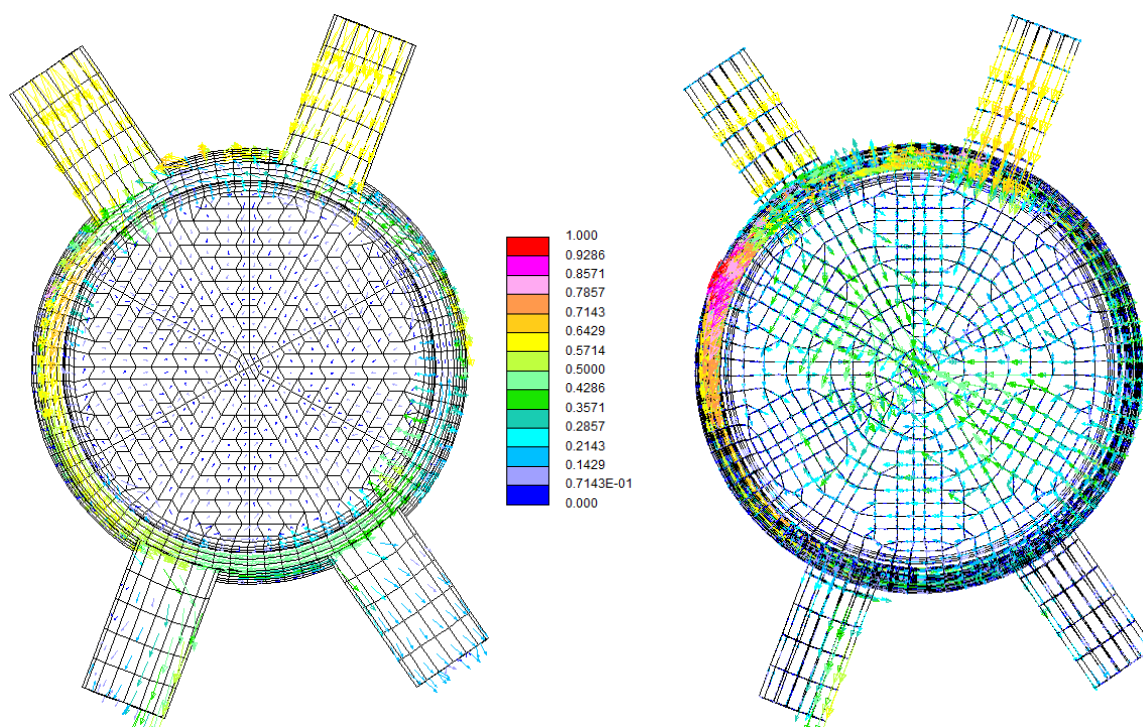


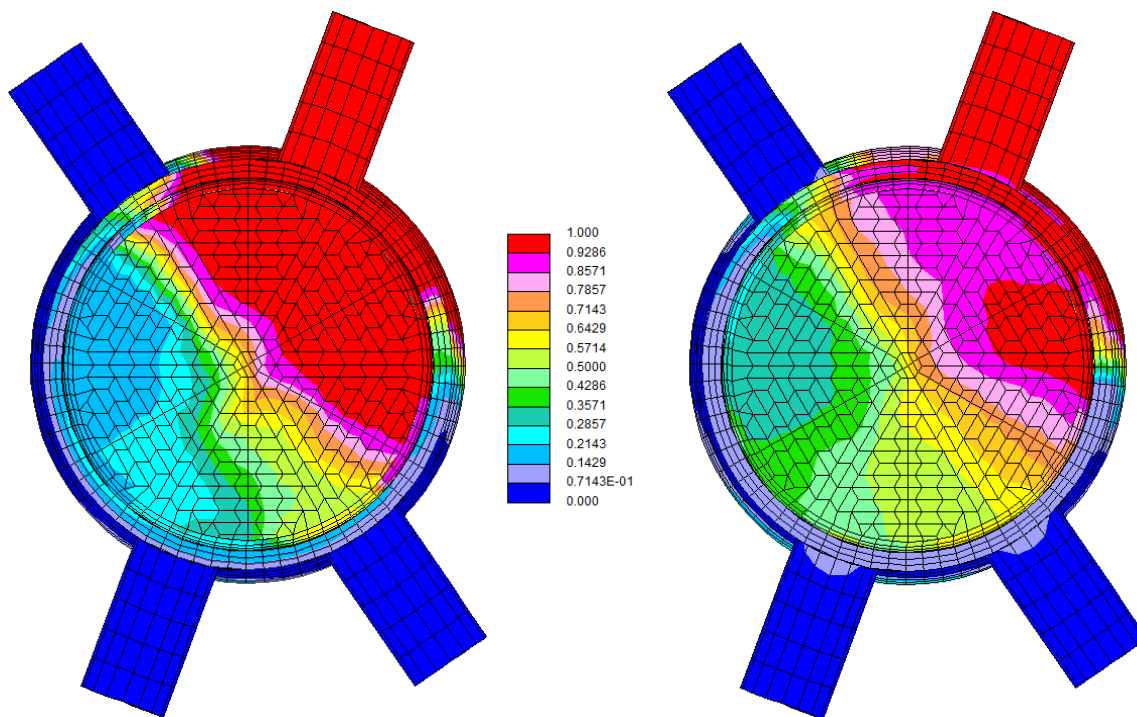
Рис. 5. Распределение относительной скорости:
а) осредненные результаты CFD расчета; б) гидравлическая модель

В качестве примера расчетного моделирования приведено исследование гидродинамики и перемешивания потоков теплоносителя с различной температурой или концентрацией борной кислоты при работе реактора на двух петлях. Для этого в патрубки подается теплоноситель с разной температурой. Расчеты проведены как для CFD модели, так и для гидравлической. Расчет смешения с помощью локально-одномерного гидравлического подхода проводился на базе исходных данных, полученных из CFD расчета.

Проведено сравнение проинтегрированных полей CFD расчета и результатов гидравлического расчета, основанного на данных, полученных CFD. Однако, несмотря на полное соответствие полей давления в нодах и расходов по связям гидравлической модели, отклонение результатов гидравлического расчета поля безразмерной температуры от референсных значений CFD расчета составило ~9%. Распределение безразмерной температуры по нодам для CFD и гидравлического расчетов представлено на рисунках 6а и 6б соответственно.

Такое отклонение результатов связано с особенностями разностных схем, применяемых для локально-одномерных методов расчета. Таким образом,

увеличение детализации расчетной модели может приводить к снижению точности расчета, что связано с проявлением пространственных особенностей течения, которые ранее не учитывались в подобных расчетах. Для нивелирования этих эффектов требуется проведение дополнительных исследований свойств разностных схем и дополнительные процедуры валидации и верификации, аналогично тем, что используются при CFD моделировании.



*Рис. 6. Поле безразмерной температуры:
а) осреднение результатов CFD расчета; б) гидравлическая модель*

Заключение

Создание пространственных теплогидравлических моделей требует увеличения количества расчетных ячеек (нодов) теплогидравлических моделей. Это в свою очередь, требует большее количество замыкающих соотношений и коэффициентов, которые отсутствуют в справочной литературе. Такие замыкающие соотношения могут быть получены только при помощи процедуры сопряжения с результатами CFD расчетов, основанной на интегрировании по каждому ноду трехмерных полей компонент вектора скорости, давления и температуры.

Кроме того требуется специальная модификация методики гидравлического расчета, компенсирующая отрицательные значения КГС по связям между нодами, возникающие из-за сонаправленности векторов скорости и градиента давления.

Таким образом, необходимым условием проведения пространственного теплогидравлического расчета является наличие известных трехмерных полей скорости и давления, что позволяет сделать вывод о том, что расчет имеет характер «воспроизведения» заданных трехмерных полей и не может являться прогнозным или «предсказательным».

Проведено моделирование исследования гидродинамики и перемешивания потоков теплоносителя с различной температурой в напорной камере РУ ВВЭР. Несмотря на полное соответствие полей давления и расходов, для поля

температуры отклонение результатов гидравлического расчета от результатов референсного CFD расчета составило ~9%.

Таким образом, при проведении пространственных локально-одномерных теплогидравлических расчетов могут возникать значительные погрешности, связанные с особенностями применения численных алгоритмов на используемых расчетных стеках.

В дальнейшем разработанная процедура обработки и визуализации результатов, а также получения замыкающих соотношений для пространственных гидравлических моделей может быть применена для реакторной установки в целом.

Список литературы

1. I. Pasichnyk, S. Nikonov, K. Velkov, Uncertainty and sensitivity analysis of fuel assembly head parameters in the framework of Kalinin-3 benchmark transient, 8-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия, 28-31 мая 2013 г.
2. V.Ivanov, K.Ivanov, P.Groudev, M.Pavlova and V.Hadjiev, *VVER-1000 Coolant Transient Benchmark, Phase 1 (VIOOCT-1), Vol. I: Main Coolant Pump Start-up - Final Specifications, Revision 3*, NEA/NSC/DOC(2002).
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М.О.Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992.672 с.
4. Control-volume method for extralarge network hydraulic analysis /V. Volkov, O.Belova, A.Skibin //Journal of Hydroinformatics. 2014. №70. С. 123 – 131.
5. В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев, Ю.Н. Надинский, А.П. Скибин // Разработка CFD модели реактора проекта АЭС-2006 Суперкомпьютерные дни в России 2016 // <http://2016.russianscdays.org/files/pdf16/556.pdf>