

О ПРОБЛЕМАХ ВЕРИФИКАЦИИ CFD-КОДОВ

*С.Н. Ложкин, к.т.н., С.А. Шевченко, к.т.н., Д.А. Яшников, к.т.н.
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)*

Введение

В последние годы в атомной отрасли активно выполняются работы по развитию и внедрению ПС, реализующих методы вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics), называемых далее CFD-кодами. Высокий уровень освоения и использования отечественных CFD-кодов в атомной энергетике отмечен в докладах проведенного в АО «ОКБМ Африкантов» (Нижний Новгород) в сентябре 2016 г. научно-технического семинара «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике» [1]. В отдельных случаях применение CFD-кодов позволяет существенно сократить объем работ по экспериментальному обоснованию проектных решений, заменив натурные эксперименты численными. Тем не менее, в настоящее время нет CFD-кодов, аттестованных для обоснования безопасности ОИАЭ. Связано это, в том числе, с проблемами верификации таких ПС, к числу которых можно отнести:

- отсутствие типовых матриц верификации для CFD-кодов;
- значительные трудности выполнения требований РД-03-34-2000 «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии» о достаточности экспериментальных данных для верификации CFD-кодов и об обеспечении необходимого качества этих экспериментальных данных (необходимость использования бесконтактных средств измерений);
- использование в CFD-кодах моделей турбулентности, область применения которых ограничена областью изменения режимных параметров тех экспериментов, на которых эти модели были получены.

На двух последних проблемах хотелось бы остановиться подробнее.

Об экспериментальных данных, необходимых для верификации CFD-кодов

Результатом расчета по CFD-кодам является двумерное или трёхмерное поле скоростей потока. Поэтому в отчетах о верификации CFD-кодов должно быть представлено сопоставление расчётных скоростей с измеренными в экспериментах. При этом верификационные тесты должны показывать работоспособность CFD-кодов для условий, характерных именно для отечественных ОИАЭ.

Поскольку скорость потока является вектором, сопоставление расчета и эксперимента только для одной из его компонент, например, продольной, нельзя использовать в качестве оценки погрешности расчета.

Поле скорости, рассчитанное на разностной сетке, состоит из локальных значений скорости, средних по объёму каждой из ячеек принятой сетки. При этом

в экспериментах измеряются значения скорости, осреднённые измерительным прибором по объёму его приёмной части. В [2] подчеркивается, что в экспериментах осреднение скоростей измерительным прибором производится одновременно и по объёму, и по времени.

Таким образом, при сравнении расчётных скоростей с измеренными необходимо учитывать, что приёмные части измерительных приборов оказывают воздействие на скорость потока, тогда как расчётные модели, реализованные в CFD-кодах, воспроизводят поле невозмущённых скоростей. Результаты измерений нельзя напрямую сравнивать с результатами расчётов в тех случаях, когда приёмная часть измерительного прибора занимает либо значительно меньший, либо значительно больший объём, чем объём ячейки расчётной сетки.

В первом случае необходимо либо уменьшить размер ячеек расчётной сетки до объёма приёмной части измерительного прибора и провести заново расчёт, либо, сохраняя расчётную сетку, провести осреднения измеренных величин по объёму ячейки сетки, и только после этого полученные результаты сопоставить с расчётными параметрами. Но столь подробных измерений, как правило, не имеется.

Во втором случае расчётные параметры должны быть предварительно усреднены по тем ячейкам сетки, что в сумме составляют объём, равный объёму приёмной части прибора. Возможность такого осреднения должна иметься у ПС, так как расчётные и экспериментально измеренные параметры должны иметь одинаковые масштабы осреднения. При этом координаты области осреднения должны совпадать с координатами приёмной части измерительного прибора.

О проблеме поправочных коэффициентов, используемых в моделях турбулентности CFD кодов

Рассмотрим теперь ещё одну проблему, связанную с верификацией CFD-кодов. Область применения моделей турбулентности CFD-кодов ограничена только теми частными задачами, на которых они были отлажены.

В моделях турбулентности коэффициенты в замыкающих соотношениях рассматриваются как константы, численные значения которых определяются способом тарировки по условию наилучшего согласия расчётных скоростей с измеренными в установившемся турбулентном потоке при конкретно заданных внешних условиях. При таком подходе найденные тарировкой значения указанных коэффициентов оказываются жёстко привязанными к условиям проведения конкретного эксперимента.

В отличие от ламинарного движения жидкости, для которого успешно работает модель сплошной среды с однородной и изотропной структурой потока, в турбулентном потоке жидкости среда не однородная и не изотропная, здесь обобщённый закон Ньютона не справедлив. Поэтому преобразования в кинематической структуре турбулентного потока, произошедшие из-за изменения внешних условий, отразятся на значениях коэффициентов в замыкающих соотношениях модели турбулентности.

Турбулентность является результатом фазового перехода второго рода, когда при каждом новом уровне внешнего энергетического воздействия в потоке непрерывно формируются свои диссипативные структуры, отвечающие уровню внешнего воздействия. Наиболее известными из диссипативных структур, построенных из вихрей различного масштаба и энергии, являются вихри Тейлора [3], ячейки Бенара [4], ячейки Никурадзе [5] и другие [6].

В турбулентном потоке всегда присутствуют вихри всех масштабов: от самых крупных (равны размеру области, занятой турбулентным движением [7]) до самых мелких (порядка $E-4$ мм [8]). Причём в установившемся режиме движения каждому стационарному набору внешних условий отвечают свои равновесные (детерминистические) значения концентраций вихрей фиксированного масштаба,

своя диссипативная структура и, соответственно, свои динамические характеристики турбулентного движения.

При изменении внешних условий в турбулентном потоке изменяются и концентрации вихрей, и динамические характеристики установившегося движения. Соответственно, должны изменяться и значения коэффициентов в замыкающих соотношениях модели турбулентности, поскольку их определяют способом тарировки в каждом из режимов с установившимся движением. Таким образом, в общем случае эти коэффициенты константами не являются.

В CFD-кодах в моделях турбулентности используются значения коэффициентов, полученные на тестовых задачах с параметрами, весьма далёкими от условий, типичных для российских ОИАЭ. Использование CFD-кодов в условиях, далёких от тех, при которых были определены значения коэффициентов моделей турбулентности, может привести не только к потере точности расчётных параметров, но и к получению качественно неверного результата.

По нашему мнению, наборы коэффициентов в моделях турбулентности CFD-кодов следует переопределять применительно к каждой конкретной задаче расчёта по следующему алгоритму:

1. Из решения конкретной тестовой задачи по условию наилучшего согласия результатов расчётов и экспериментов находятся значения коэффициентов в замыкающих соотношениях модели турбулентности. Если полученная точность не удовлетворяет запросам практики, то модель турбулентности корректируется или отбраковывается.
2. Процедура, описанная в п. 1, выполняется для всего множества тестовых задач.
3. Для каждого из коэффициентов в модели турбулентности подбирается корреляционная зависимость, аппроксимирующая изменения значений этого коэффициента в границах диапазона параметров, проверенных расчётом тестовых задач.
4. По найденным корреляционным зависимостям задаются значения коэффициентов в замыкающих соотношениях модели турбулентности и проводятся расчёты тестовых задач. Фиксируются отклонения скоростей или других расчётных параметров от измеренных.
5. Границы применения корреляционных зависимостей записываются в раздел проекта аттестационного паспорта «Область применения ПС по условиям и параметрам расчёта», а погрешности для конкретного расчётного параметра – в раздел «Погрешность, обеспечиваемая ПС в области его применения».

Реализация приведенного выше алгоритма способна позволить выполнить требования РД-03-34-2000 при проведении верификации CFD кодов. Однако надо отметить следующие недостатки данного подхода:

- применение ПС за пределами верифицированной области применения, может привести к получению расчётных результатов, неадекватных физической реальности, так как подобранные в ходе реализации описанного подхода корреляционные зависимости, просто аппроксимируют конкретно заданные наборы экспериментальных данных. Поэтому их экстраполяция за границы применимости не исключает получения не только количественно, но и качественно неверных результатов;

Реализация приведенного алгоритма потребует решения весьма многих тестовых задач в широком диапазоне расчётных параметров, характерном для эксплуатации отечественных ОИАЭ, и поиска соответствующих экспериментальных данных.

Приведенные недостатки являются прямым следствием того, что в описанном алгоритме значения коэффициентов в замыкающих соотношениях моделей турбулентности определяются исходя из условия наилучшего согласия расчётных скоростей с измеренными. Эти значения жёстко привязаны к кинематической структуре

конкретного эксперимента и при переходе к другому эксперименту их необходимо вычислять заново.

Следует отметить, что значения коэффициентов замыкающих соотношений в моделях турбулентности CFD-кодов возможно определять и альтернативными способами. Один из таких способов предложен, например, в [9]. В ФБУ «НТЦ ЯРБ» разработано и применяется ПС поверочного детерминистического расчёта теплогидравлики в ТВС - CPCTFA - Calculative Program to Check Thermal-hydraulics in Fuel Assemblies [10], в котором поправочные коэффициенты находят с использованием алгоритма, имитирующего организацию равновесия в системе «поток – внешняя среда».

Заключение

С одной стороны, использование CFD кодов для решения практических задач по проектированию и обоснованию безопасности объектов использования атомной энергии приобретает все большую актуальность, с другой – остаются нерешенными проблемы верификации таких ПС, к числу которых относятся проблемы экспериментальных данных и моделей турбулентности, подробно описанные в данной статье.

Для решения обсуждаемых в статье проблем, необходимо:

- определить конкретные задачи обоснования безопасности, для которых требуется применение CFD кодов;
- сформировать типовые матрицы верификации CFD кодов для каждого класса задач;
- сформировать дополнительные критерии оценки точности при сравнении результатов расчета по CFD кодам с экспериментальными данными;
- разработать требования к качеству экспериментальных данных, используемых для верификации CFD кодов.

Литература

1. Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике: научно-техн. семинар / Материалы семинара – Н. Новгород, АО «ОКБМ Африкантов», 13 - 14 сентября 2016 г.
2. Слѣзкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. - М.: ГИТТЛ, 1955.
3. Кадомцев Б.Б., Рыдник В.И. Волны вокруг нас. - М.: Знание, 1981.
4. Климонтович Н.Ю. Без формул о синергетике. – Минск: «Вышэйшая школа», 1986.
5. Ложкин А.С., Ложкин С.Н., Скребков Г.П., Уголева И.Р. Гидравлический расчёт с выделением ячеек Никурадзе в ТВС со стержневыми твэлами / В сб.: Доклады научно-технической конференции «Теплофизические экспериментальные и расчётно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2011)», том 1, с. 62 – 77. – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2013.
6. Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности. Пер. с англ./Под ред. Х. Суинни, Дж. Голлаба. – М.: Мир, 1984.
7. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах (Авт.: М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков, Г.И. Сабелев, Г.С. Таранов) - М.: Атомиздат, 1978.
8. Турбулентность. Принципы и применения (Ред.: У. Фрост, Т. Моулден). - М.: Машиностроение, 1980.
9. Ложкин А.С., Ложкин С.Н. Закон самоорганизации и его применение в расчёте турбулентных потоков (отбор детерминистического решения). – Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. (заказ по E-mail: info@lap-publishing.com).
10. Ложкин С.Н. CPCTFA - Calculative Program to Check Thermal-hydraulics in Fuel Assemblies – код поверочного детерминистического расчёта теплогидравлики в ТВС / 8-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС С ВВЭР». - Подольск, ФГУП ОКБ «Гидропресс», 28-31 мая 2013г. - Материалы конференции.

