

2) разработка сеточной модели на основе параметров твердотельной модели и особенностей математической модели ([1, 11] и рекомендаций разработчика кода);

3) выбор схемы дискретизации [1, 11, 19];

4) выбор итерационного алгоритма решения полученной системы уравнений [22];

5) ввод исходных параметров (параметры рабочей среды, начальные и граничные условия и т.д.);

6) автоматизация процесса моделирования для сокращения трудозатрат (временных затрат) и снижения риска возникновения ошибок субъективного характера [17, 18].

Более подробно процесс создания компьютерных моделей описан в [22] и методических рекомендациях (methodology) к каждому программному продукту.

Валидация результатов моделирования — процесс определения того, насколько точно реализация математической модели передает ее концептуальное описание (концептуальную модель), представленное разработчиком. Процесс валидации представляет собой многоступенчатую отладку концептуальной модели для того, чтобы гарантировать, что ошибка в количественной оценке рассчитываемых величин, связанная с особенностями сеточной модели, величиной шага по времени (для расчетов нестационарных процессов), выбором порядка разностной схемы, выбором модели турбулентности и т.д., сведена к минимуму. При этом для оценки величины ошибки при решении конкретной задачи необходимо решить следующие подзадачи [1, 11]:

1) обеспечение качества ввода исходных данных разработанной модели (исключение субъективных факторов) [17, 18];

2) исследование сходимости итерационной процедуры и оценка ошибок, связанных с выбором критериев итерационной сходимости;

3) оценка ошибок округления;

4) проверка выполнения балансовых соотношений, например баланса по массе, импульсу и энергии;

5) проверка сеточной сходимости;

6) проверка сходимости по времени;

7) оценка ошибок, связанных с выбором схем дискретизации по пространству и по времени;

8) выполнение процедур по определению и ограничению ошибок пользователя.

Более подробная информация об особенностях процесса валидации изложена в [1, 11]. После того как в процессе валидации ошибки дискретизации и итерационной сходимости достигают заданного значения, можно переходить к процессу верификации.

Верификация результатов численного моделирования — совокупность исследований по оценке адекватности разработанной (выбранной) математической модели реально существующим рабочим процессам, протекающим в объекте исследования (как правило, на основе сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными, аналитическими данными или результатами моделирования рабочих процессов в рамках верифицированных программных комплексов). При этом процесс *моделирования рабочих процессов* в объекте исследования (который, как правило, имеет сложную пространственную конфигурацию и характеризуется большим количеством физических явлений) подразумевает следующие шаги:

- решение тестовых задач для верификации результатов моделирования отдельных физических явлений, характерных для рассматриваемой пневмогидравлической системы;
- решение тестовых задач для верификации результатов моделирования совокупности физических явлений;
- решение тестовых задач для верификации результатов моделирования в вариантах подсистем рассматриваемой системы;
- верификация компьютерной модели в полномасштабной пневмогидравлической системе (если возможно).

В рамках предложенного подхода верификация разработанной модели проводится на основе последовательного моделирования отдельных физических явлений на простой геометрической форме, которые затем постепенно усложняются и переносятся на более сложную геометрическую область. При этом процесс верификации напоминает процедуру аттестации кодов с составлением и заполнением матриц верификации. Подробнее этот процесс описан в работах [1, 11].

Основной сложностью для процесса верификации является получение экспериментальных данных, являющихся базой для оценки правильности результатов моделирования. Основные базы экспериментальных данных для ПГС представлены в [2]. Подробные инструкции по составлению и заполнению *матриц верификации* приведены в [23].

Разработка отчетной документации. При проведении численных исследований необходимо документальное подтверждение содержания и результатов любых теплогидравлических расчетов, особенно для верификационных и валидационных. Соответствующая информация должна быть записана, заархивирована и передана заказчику. Документация должна быть полной, последовательной и соответствовать требованиям нормативных документов предприятия. При проведении анализа теплогидравлических расчетов должны быть разработаны и документированы *требования к оформлению* подобной документации.

Разработка требований к документации представляет собой достаточно долгосрочный процесс. При оформлении качественных расчетов должны быть подробно документированы предположения, допущения, аппроксимации, упрощения, геометрические параметры расчетной области и источники исходных данных. Документальное обоснование CFD-расчетов должно быть организовано таким образом, чтобы сторонний эксперт мог четко оценить объем и качество проделанной работы. Уровень проработки требуемой документации может сильно зависеть от требований заказчика, изложенных в техническом задании.

Выводы. В основе предложенной методики проведения CFD-расчетов лежат международные рекомендации и многолетний опыт авторов в CFD-моделировании. На первый взгляд, многие из пунктов методики могут показаться очевидными или не влияющими на конечный результат моделирования процессов в ПГС. Однако, как показывает практика, пренебрежение любым из предложенных этапов может привести к ошибкам, которые становятся очевидными только на этапе верификации. Более того, в некоторых случаях необходимо расширение и углубление предложенной методики.

В то же время в большинстве случаев (например, при моделировании дозвуковых теплогидравлических процессов в однофазной постановке) применение настоящей методики позволяет получить достоверные результаты и определить требуемые параметры объекта исследования с необходимой точностью с приемлемыми временными затратами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications. *Nea/CSNI/R*, (2007)5, 154 p.
- [2] Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems. *Nea/CSNI/R*, (2007)13, 180 p.
- [3] Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problems (Phase 2). *Nea/CSNI/R*, (2007)13.
- [4] Menter F. CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications. *European Commission, 5th EURATOM Framework Programme, Report. EVOLECORA-D1*, 2002.
- [5] Casey M., Wintergerste T. Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD. *Best Practice Guidelines, Ver. 1. ERCOFTAC Report*, 2000.
- [6] Casey M., Wintergerste T. The best practice guidelines for CFD. A European initiative on quality and trust. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, v. 448, N. 1, 2002, pp. 1–10.
- [7] AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. *AIAA Report, G-077-1988*, 1998.
- [8] Roache P.J. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers, 1998.

- [9] Oberkampf W.L., Trucano T.G. Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, 2002, pp. 209–272.
- [10] Oberkampf W.L., Trucano T.G., Hirsch C. Verification, Validation and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics. *Applied Mechanics Reviews*, vol. 57, 2004, pp. 345–384.
- [11] *Computational fluid dynamics best practice guidelines for dry cask applications. Final report.* NUREG-2152. U.S. NRC, 2013, 117 p.
- [12] Сб. тезисов научно-технического семинара «Проблема верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике». Нижний Новгород, ОАО «ОКБМ Африкантова», 2012, 62 с.
- [13] Себиси Т., Бредшоу П. *Конвективный теплообмен.* Москва, Мир, 1987, 593 с.
- [14] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкостей и газа* (7-е изд.). Москва, Дрофа, 2003, 840 с.
- [15] Гарбарук А.В., Стрелец Х.М., Шур Л.М. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений.* Санкт-Петербург, Наука и современность: Докл. международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2011, с. 260–264.
- [16] Патанкар С.В. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.* Москва, Энергоатомиздат, 1984, 152 с.
- [17] Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей.* Москва, Мир, 1991, т. 1, 504 с.
- [18] Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей.* Москва, Мир, 1991, т. 2, 552 с.
- [19] Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid Dynamics. *The Finite Volume Method. England: Longman & Technical*, 1995, 267 p.
- [20] Validation matrix for the assessment of thermal-hydraulic codes for VVER LOCA and transients. *A report by the OECD support group on the VVER thermal-hydraulic code validation matrix.* NEA/CSNI/R, (2001)4, 2001, 249 p.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/763.html>

Белова Ольга Владимировна родилась в 1971 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области компьютерного моделирования инженерных систем. e-mail: ovbelova@yandex.ru

Волков Василий Юрьевич родился в 1989 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Инженер ОАО «ВНИИАЭС». Специализируется в области вычислительной газодинамики и тепломассообмена.

Скибин Александр Петрович родился в 1963 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1988 г. Канд. техн. наук, начальник бюро ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Автор более 80 научных работ в области вычислительной гидрогазодинамики и тепломассообмена. e-mail: askibin@yandex.ru

Николаева Анна Владимировна родилась в 1986 г., окончила Московский энергетический институт (Технический университет) в 2009 г. Канд. техн. наук, инженер-конструктор ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Автор более 20 научных работ и 3 патентов РФ.

Крутиков Алексей Александрович родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, инженер-конструктор ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Автор более 20 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов в элементах пневмогидравлических систем.

Чернышев Андрей Владимирович родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и элек-тропневматического оборудования различного назначения. e-mail: av-chernyshev@yandex.ru