ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57700.15— 2018

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2018

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Закрытым акционерным обществом «Т-Сервисы» (ЗАО «Т-Сервисы») совместно с Обществом с ограниченной ответственностью «ТЕСИС» (ООО «ТЕСИС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 февраля 2018 г. № 55-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2018

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины, определения и сокращения . . . 2
4 Общие положения . . . 2
5 Требования к валидации ПО . . . 3
6 Рекомендуемые эталоны для проведения валидации ПО . . . 4
6.1 Плоская затопленная струя . . . 4
6.2 Круглая затопленная струя . . . 5
6.3 Стационарное течение жидкости между вращающимися цилиндрами . . . 5
6.4 Ламинарное течение около цилиндра . . . 5
6.5 Медленное течение около сферы . . . 6
6.6 Медленное вращение сферы . . . 6
6.7 Свободная конвекция в квадратной полости . . . 7
6.8 Ламинарное течение около притупленной пластины . . . 7
6.9 Ламинарное течение во внезапно расширяющемся канале . . . 8
7 Требования к отчету о валидации ПО . . . 8
Приложение А (рекомендуемое) Рекомендуемый вид отчета о валидации . . . 10
Приложение Б (рекомендуемое) Пояснение терминов, используемых в стандарте . . . 11
Библиография . . . 11

Введение

Цель валидации программного обеспечения (ПО) компьютерного моделирования (КМ), предназначенного для численного моделирования ламинарных дозвуковых течений жидкости или газа, заключается в подтверждении возможности ПО воспроизводить характеристики реального ламинарного течения жидкости или газа. Валидация такого ПО осуществляется путем решения эталонных задач. Рекомендуемые эталонные задачи перечислены в данном стандарте.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО

Numerical modeling of physical processes.
Numerical simulation of laminar flows of viscous liquids and gases. Software validation

Дата введения — 2019—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет общие требования к валидации программного обеспечения компьютерного моделирования, применяемого для численного моделирования ламинарного дозвукового движения (течения) жидкости или газа. Течение может сопровождаться переносом тепла, диффузией компонентов и химическими реакциями. В зависимости от рассматриваемого диапазона условий правильную картину течения можно получать в рамках моделей несжимаемой жидкости, слабосжимаемой жидкости или сжимаемой жидкости. В потоке могут присутствовать сдвиговые слои, пограничные слои и зоны рециркуляции.

Настоящий стандарт применим для валидации программного обеспечения компьютерного моделирования при проведении его сертификации в соответствии с ГОСТ Р 57700.1 и ГОСТ Р 57700.2.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2.052—2015 ЕСКД Электронная модель изделия. Общие положения

ГОСТ 28195—89 Оценка качества программных средств. Общие положения

ГОСТ Р 8.883—2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Программное обеспечение средств измерений. Алгоритмы обработки, хранения, защиты и передачи измерительной информации. Методы испытаний

ГОСТ Р 57188 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения

ГОСТ Р 57700.1 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования

ГОСТ Р 57700.2 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения

ГОСТ Р 57700.9 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Верификация ПО

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана

Издание официальное

датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 57188, а также следующие термины с соответствующими определениями (дополнительное пояснение терминов в приложении Б):

3.1.1 **вязкая жидкость, вязкий газ:** Среда, при движении которой проявляются вязкие эффекты, определяемые величиной динамического коэффициента вязкости.

3.1.2 **объект моделирования:** Явление, объект или свойство объекта реального мира.

3.1.3 **моделирование:** Изучение свойств и/или поведения объекта моделирования, выполненное с использованием его моделей.

3.1.4

компьютерная модель (*электронная модель*): Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

[ГОСТ 2.052—2015, статья 3.1]

3.1.5 **сжимаемое течение:** Течение, в котором влияние зависимости плотности от давления существенно.

3.1.6 **слабосжимаемое течение:** Один из вариантов дозвукового течения — плотность такого течения зависит от других параметров (температуры, концентрации компонентов среды и т. д.).

3.1.7 **несжимаемое течение:** Течение, при котором любой вмороженный в жидкость объем не меняет своей величины, при этом вариация плотности по объему среды может быть произвольной.

3.1.8 **вмороженный объем:** Объем, границы которого движутся вместе с жидкостью.

3.1.9 **дозвуковое течение жидкости:** Течение, при котором местная скорость жидкости меньше местной скорости звука во всей области расчета.

3.1.10 **ламинарное течение:** Слоистое течение без случайных пульсаций скорости, давления, температуры и других характеристик течения.

3.1.11 **погрешность вычислений:** Отклонение численного результата от эталонного, выраженного в некоторой норме.

3.1.12 **характеристики течения:** Физические величины, позволяющие количественно охарактеризовать рассматриваемое течение: давление, скорость, плотность, температура и др.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

КМ — компьютерная модель;

ОМ — объект моделирования;

ПО — программное обеспечение;

ЭУ — экспериментальная установка.

4 Общие положения

4.1 ПО, предназначенное для численного моделирования ламинарных течений жидкости или газа, должно адекватно интегрировать по пространству и времени или только по пространству уравнения математической модели, описывающей ламинарное дозвуковое течение жидкости и газа.

4.2 В данном стандарте рассматриваются течения трех типов, являющиеся частными случаями ламинарного дозвукового течения:

- несжимаемое течение;
- слабосжимаемое течение;
- сжимаемое течение.

4.3 Валидация ПО, предназначенного для численного моделирования ламинарных течений жидкости или газа, осуществляется путем решения эталонных задач и тестовых задач, представляющих интерес конечного потребителя ПО КМ (ГОСТ Р 8.883—2015, пункт 6.5.5).

4.4 Результатом решения эталонной задачи являются набор характеристик, определяющих решение задачи. Отклонение численного результата от эталонного, выраженного в некоторой норме, называют погрешностью вычислений. Возможные источники погрешности (причины отклонения) следующие:

- несоответствие математической модели рассматриваемым процессам;
- погрешность в граничных условиях;
- погрешность в начальных условиях;
- погрешность аппроксимации дифференциальных уравнений разностными схемами;
- ошибки округления чисел в компьютере;
- погрешность самого эталонного результата, если он получен экспериментально.

4.5 Несоответствие математической модели рассматриваемым процессам

При упрощении математической модели или при незнании реальных физических процессов в среде точность описания моделью реального течения может быть снижена.

4.6 Погрешность в граничных условиях

Любое численное моделирование ламинарных течений производится в ограниченной области расчета, на границах которой задаются граничные условия. Эти условия не всегда точно соответствуют реальным условиям в соответствующих точках пространства. Например, в численной постановке на входе в расчетную область задается постоянная скорость, тогда как в эксперименте имеет место некоторое распределение скорости по входному сечению. То же самое возможно и с другими характеристиками течения.

4.7 Погрешность в начальных условиях

При решении нестационарных задач правильное задание начальных условий важно для адекватного воспроизведения развития течения во времени. Поэтому при отклонении заданных начальных условий (начальных распределений скорости, давления, температуры и т. д.) от реальных в каждый момент времени будет наблюдаться отклонение значения наблюдаемой характеристики течения от эталонного значения этой характеристики.

4.8 Погрешность аппроксимации дифференциальных уравнений разностными схемами. Дискретизация уравнений математической модели неизбежно вносит погрешность в результат моделирования. Теоретическому рассмотрению данного вопроса посвящено много работ, например [1], [2]. Эта погрешность зависит от используемого численного метода и используемой конечно-разностной схемы. Обычно погрешность метода / схемы выражается как $O(h^n\tau^m)$. Здесь h — средний размер расчетной ячейки, τ — шаг интегрирования дифференциальных уравнений по времени. Отсюда следует, что расчетная сетка должна обеспечивать минимальную погрешность аппроксимации дифференциальных уравнений, а в нестационарных задачах шаг интегрирования по времени должен правильно воспроизводить эволюцию рассматриваемого течения. Именно на минимизацию погрешности аппроксимации направлены исследования сходимости решения по сетке и по шагу интегрирования дифференциальных уравнений по времени.

4.9 Ошибки округления чисел в компьютере

Как правило, это не вносит значимой погрешности в результат моделирования, если численный метод интегрирования дифференциальных уравнений устойчив. В противном случае погрешность округления «накапливается», и это может приводить к неустойчивости решения.

4.10 Погрешность самого эталонного результата, если он получен экспериментально

Данный тип погрешности определяется согласно стандартным методикам определения ошибки эксперимента.

5 Требования к валидации ПО

5.1 Перед валидацией должна быть проведена верификация, применение которой определяется ГОСТ Р 57700.9.

5.2 Точность соответствия результатов решения и эталона не стандартизуется, но определяется потребностями конкретного потребителя данного ПО КМ.

5.3 Цель валидации ПО КМ, предназначенного для численного моделирования ламинарных течений жидкости или газа, заключается в подтверждении возможности ПО воспроизводить определенные

особенности течения с определенной точностью, удовлетворяющей потребности конечного пользователя при моделировании ламинарного дозвукового течения жидкости и газа.

5.4 Данный стандарт дает рекомендации по оценке качества ПО КМ, предназначенного для решения практических гидродинамических задач, посредством его валидации (ГОСТ 28195—89, раздел 2).

5.5 Валидация применяется для:

- сертификации ПО КМ;
- проверки соответствия ПО КМ стандартам организации по использованию ПО КМ;
- анализа области применимости ПО КМ, предназначенного для моделирования ламинарных течений, конечным пользователем;
- анализа области применимости и создания документации ПО КМ разработчиком данного ПО КМ.

5.6 Валидационные задачи основаны на эталонных данных, полученных одним из следующих способов:

- экспериментальным путем;
- аналитическим путем.

5.7 Определение ошибки из-за дискретизации по пространству и сходимости по расчетной сетке при решении валидационных тестов с помощью ПО КМ

Провести исследование сходимости результатов расчетов по расчетной сетке. При этом должно быть доказано, что сходимость результатов имеет асимптотику $O(h^n)$, где n — степень аппроксимации расчетной схемы по прстранству, h — размер расчетной ячейки (элемента для конечно-элементных сеток, или расстояния между частицами для бессеточных методов).

5.8 Определение ошибки из-за дискретизации по времени

Для эталонов, моделирующих нестационарные ламинарные течения, провести исследование сходимости результатов расчетов по используемому шагу по времени и доказать, что сходимость имеет асимптотику $O(\tau^m)$, где m — степень аппроксимации расчетной схемы по времени, τ — шаг по времени вычислительного алгоритма.

5.9 Определение ошибки из-за величины области расчета

Исследовать влияние изменения положения входных и выходных границ на получаемую ошибку посредством проведения расчетов в последовательно увеличиваемой области расчета.

5.10 Требования к валидационным тестам и к процедуре валидации:

а) валидационные тесты для ПО КМ, предназначенного для моделирования ламинарных течений, должны:

1) быть неоднократно проверены научным сообществом;

2) сопровождаться подробным описанием, обеспечивающим воспроизводимость и повторяемость процедуры получения валидационных данных;

3) соотноситься с целями и задачами применения ПО КМ для моделирования ламинарных течений конечным пользователем;

б) детальное описание процедуры валидации должно быть утверждено заинтересованной стороной и передано стороне, выполняющей валидацию;

в) процедура валидации может быть описана согласно ГОСТ Р 57700.1 и ГОСТ Р 57700.2.

6 Рекомендуемые эталоны для проведения валидации ПО

6.1 Плоская затопленная струя

6.1.1 Описание

Рассматривается двухмерное ламинарное несжимаемое течение, инициированное плоской струей, истекающей в полубесконечное пространство. Картина течения показана в [3] на с. 517.

6.1.2 Постановка

Задача численно решается в двухмерной постановке. Область расчета представляет собой прямоугольник. Левая граница — стенка с прорезью, через которую жидкость втекает в расчетную область. На правой, верхней и нижней границах задается условие дозвукового выхода с фиксированным статическим давлением. Через верхнюю и нижнюю границы происходит «подсос» жидкости из окружающего пространства.

6.1.3 Расчеты

Рассчитывается пространственное распределение скорости.

6.1.4 Эталон

Численное решение сравнивается с аналитическим, представленным в [3] на с. 521.

6.1.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать «сдвиговое» течение (shear layer);
- моделировать границы, через которые возможен выход и вход жидкости.

6.2 Круглая затопленная струя

6.2.1 Описание

Рассматривается ламинарное несжимаемое течение, инициированное круглой струей, истекающей в полубесконечное пространство.

6.2.2 Постановка

Задача численно решается в трехмерной постановке. Область расчета представляет собой цилиндр. Левая граница — стенка с круглым отверстием, через которое жидкость втекает в расчетную область. На правой и цилиндрической границах задается условие дозвукового выхода с фиксированным статическим давлением. Через цилиндрическую границу происходит «подсос» жидкости из окружающего пространства.

6.2.3 Расчеты

Рассчитываются пространственное распределение скорости и массовый расход в струе как функция расстояния от входа струи в расчетную область.

6.2.4 Эталон

Численное решение сравнивается с аналитическим, представленным в [3] на с. 565.

6.2.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать трехмерное «сдвиговое» течение (shear layer);
- моделировать границы, через которые возможен выход и вход жидкости.

6.3 Стационарное течение жидкости между вращающимися цилиндрами

6.3.1 Описание

Рассматривается двухмерное ламинарное несжимаемое течение жидкости в концентрическом канале между соосными цилиндрами. Цилиндры вращаются с фиксированными угловыми скоростями.

6.3.2 Постановка

Задача численно решается в двухмерной постановке. Область расчета представляет собой кольцо. На окружностях, ограничивающих область расчета, задается условие прилипания.

6.3.3 Расчеты

Рассчитываются распределение скорости между цилиндрами, а также силы и моменты сил, действующие на поверхности цилиндров.

6.3.4 Эталон

Численное решение сравнивается с аналитическим. Примеры аналитического расчета и теорию — см. [3], с. 432 и [4], с. 447.

6.3.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать стационарное двухмерное течение вязкой жидкости около твердых подвижных криволинейных поверхностей;
- рассчитывать силы и моменты, действующие на эти поверхности.

6.4 Ламинарное течение около цилиндра

6.4.1 Описание

Рассматривается двухмерное ламинарное несжимаемое течение жидкости около цилиндра. Задаются различные значения скорости набегающего потока, ограниченные условием $Re < 10^5$ (см. [5], с. 410). Наблюдаются различные режимы течения:

- при $Re < 0,5$ течение является практически безотрывным;
- в диапазоне $2 < Re < 30$ наблюдаются два симметричных вихря, вращающихся в противоположные стороны;

- при $Re > 90$ наблюдается асинхронный периодический срыв вихрей с двух сторон цилиндра (дорожка Кармана).

6.4.2 Постановка

Задача численно решается в двухмерной постановке. Область расчета представляет собой прямоугольник (внешние границы). В прямоугольнике сделан круглый вырез (поверхность цилиндра). В область расчета жидкость втекает слева. На левой границе задается скорость жидкости или ее удельная массовая скорость. На всех остальных внешних границах задается условие выхода с фиксированным статическим давлением. На поверхности цилиндра задается условие прилипания.

6.4.3 Расчеты

Рассчитываются коэффициент сопротивления цилиндра и число Струхаля (в режиме дорожки Кармана). Число Струхаля определяется соотношением

$$Sh = fD / U.$$

Здесь f — частота периодического процесса, протекающего в жидкости или газе, U — скорость невозмущенного потока, D — диаметр цилиндра.

6.4.4 Эталон

Численное решение сравнивается с экспериментальными данными — см. [6], с. 296.

6.4.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать стационарное течение вязкой жидкости около неподвижной твердой криволинейной поверхности;
- определять положение отрыва потока от твердой криволинейной поверхности;
- моделировать нестационарное течение вязкой жидкости около неподвижной твердой криволинейной поверхности;
- рассчитывать силу, действующую на твердую криволинейную поверхность.

6.5 Медленное течение около сферы

6.5.1 Описание

Рассматривается медленное трехмерное ламинарное несжимаемое течение жидкости около сферы.

6.5.2 Постановка

Задача численно решается в трехмерной постановке. Область расчета представляет собой параллелепипед (внешние границы). В параллелепипеде сделан сферический вырез (поверхность сферы). В область расчета жидкость втекает слева. На левой границе задается скорость жидкости или ее удельная массовая скорость. На всех остальных внешних границах задается условие выхода с фиксированным статическим давлением. На поверхности сферы задается условие прилипания.

6.5.3 Расчеты

Задается значение скорости набегающего потока, ограниченное условием $Re < 0{,}2$. Наблюдается безотрывное течение.

6.5.4 Эталон

Рассчитывается коэффициент сопротивления сферы. Численное решение сравнивается с аналитическим. Пример аналитического расчета — см. [5], с. 411, 415.

6.5.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать стационарное течение вязкой жидкости около неподвижной твердой криволинейной поверхности;
- рассчитывать силу, действующую на твердую криволинейную поверхность.

6.6 Медленное вращение сферы

6.6.1 Описание

Рассматривается трехмерное ламинарное несжимаемое течение жидкости около медленно вращающейся сферы.

6.6.2 Постановка

Задача численно решается в трехмерной постановке. Область расчета представляет собой параллелепипед (внешние границы). В параллелепипеде сделан сферический вырез (поверхность сферы).

На всех внешних границах задается условие выхода с фиксированным статическим давлением. Сфера вращается с фиксированной угловой скоростью. На поверхности сферы задается условие прилипания.

6.6.3 Расчеты

Рассчитывается действующий на сферу момент силы трения.

6.6.4 Эталон

Численное решение сравнивается с аналитическим. Аналитическое решение приведено в [4] на с. 503.

6.6.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать стационарное трехмерное течение вязкой жидкости около подвижной твердой криволинейной поверхности;
- рассчитывать силу и момент силы, действующие на эту поверхность.

6.7 Свободная конвекция в квадратной полости

6.7.1 Описание

Рассматривается двухмерное ламинарное течение газа в замкнутой полости, инициированное силой Архимеда.

6.7.2 Постановка

Задача численно решается в двухмерной постановке. Область расчета представляет собой квадрат. На всех внутренних поверхностях квадрата задается условие прилипания. Сила тяжести направлена вниз. Температура левой стенки выше температуры правой стенки. Верхняя и нижняя стенки теплоизолированы.

6.7.3 Расчеты

Рассчитываются пространственные распределения скорости, давления, плотности и температуры, а также тепловые потоки на вертикальных стенках.

6.7.4 Эталон

Численное решение сравнивается с точным, представленным в [7].

6.7.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать свободную конвекцию;
- рассчитывать теплоперенос в сжимаемом газе.

6.8 Ламинарное течение около притупленной пластины

6.8.1 Описание

Рассматривается двухмерное ламинарное течение жидкости около пластины конечной толщины, передняя кромка которой перпендикулярна поверхности пластины и направлению потока (внешнее течение около прямого уступа). Рабочим веществом является воздух.

6.8.2 Постановка

Задача численно решается в двухмерной постановке. Область расчета представляет собой параллелепипед со ступенькой. В область расчета жидкость втекает слева. На левой границе задается скорость жидкости или ее удельная массовая скорость. На верхней и правой границах задается условие выхода с фиксированным статическим давлением. На нижней границе перед ступенькой задается условие симметрии. Высота ступеньки равна половине толщины пластины. На ступеньке и на поверхности пластины (на нижней границе за ступенькой) задается условие прилипания. Течение медленное, поэтому в расчетах плотность воздуха можно задавать постоянной.

6.8.3 Расчеты

Рассчитываются пространственные распределения скорости и давления.

6.8.4 Эталон

В [8] представлены экспериментальные значения длины рециркуляционной зоны, полученные при различных значениях числа Рейнольдса, вычисленного по толщине пластины. Максимальное число Рейнольдса, при котором в экспериментах наблюдается стационарный отрывной пузырь, равно 325. Полученная в расчетах длина рециркуляционной зоны сравнивается с соответствующим экспериментальным значением.

6.8.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать отрыв и присоединение ламинарного потока;
- моделировать внешние рециркуляционные течения несжимаемой жидкости.

6.9 Ламинарное течение во внезапно расширяющемся канале

6.9.1 Описание

Рассматривается двухмерное ламинарное течение жидкости во внезапно расширяющемся канале (внутреннее течение около обратного уступа). Рабочим веществом является воздух.

6.9.2 Постановка

Задача численно решается в двухмерной постановке. Область расчета представляет собой вытянутый параллелепипед со ступенькой. В область расчета жидкость втекает слева. На левой границе задается скорость жидкости или ее удельная массовая скорость. На правой границе задается условие выхода с фиксированным статическим давлением. На остальных границах задается условие прилипания. Течение медленное, поэтому в расчетах плотность воздуха можно задавать постоянной.

6.9.3 Расчеты

Рассчитываются пространственные распределения скорости и давления.

6.9.4 Эталон

В [9] представлены экспериментальные значения длины рециркуляционной зоны, полученные при различных значениях числа Рейнольдса, вычисленного по высоте ступеньки. Полученная в расчетах длина рециркуляционной зоны сравнивается с соответствующим экспериментальным значением.

6.9.5 Цель

На данной тестовой задаче проверяется возможность ПО:

- моделировать отрыв и присоединение ламинарного потока;
- моделировать внутренние рециркуляционные течения несжимаемой жидкости.

7 Требования к отчету о валидации ПО

7.1 Отчет о валидации ПО КМ является основным документом, обосновывающим способность ПО КМ рассчитывать характеристики ламинарных течений с контролируемой погрешностью.

7.2 Состав и содержание отчета о валидации ПО КМ должны соответствовать требованиям настоящего стандарта (рекомендуемый вид отчета о валидации в приложении А).

7.3 Отчет о валидации ПО КМ должен содержать следующие разделы:

- Валидация расчетной методики;
- Описание валидационных расчетов;
- Описание экспериментальных установок и представление экспериментальных данных;
- Результаты валидации ПО КМ;
- Перечень источников.

7.4 В разделе «Валидация расчетной методики» должно быть приведено обоснование ПО КМ с точки зрения способности адекватно моделировать реальные процессы и объекты. Для этого должны быть приведены:

- область моделирования и пределы применения ПО КМ;
- перечень заявленных к сертификации расчетных параметров и величины максимального отклонения этих параметров при различных параметрах моделирования;
- количественная оценка погрешностей моделирования.

7.5 В разделе «Описание валидационных расчетов» должны быть приведены перечень расчетных тестов, использованных для обоснования ПО КМ, и краткое (но достаточное для понимания) описание каждого из них со ссылкой на источник информации, где это описание приведено подробно. Должны быть указаны диапазоны и погрешности сопоставляемых расчетных параметров. В качестве эталонных могут использоваться результаты расчетов, выполненные с помощью сертифицированного ранее ПО КМ, и/или результаты, полученные на ЭУ.

7.5.1 Если для валидации ПО КМ используются результаты, полученные на ЭУ, то должно быть приведено их описание в разделе «Описание экспериментальных установок и представление экспериментальных данных». В данном разделе должно быть приведено:

- описание ЭУ и представлены экспериментальные данные, используемые для валидации ПО КМ (допускается приводить в одном разделе: описание ЭУ, выполненных на ней экспериментов или испытаний и результаты валидации ПО КМ по этим экспериментам или испытаниям);
- описание экспериментальных тестов, экспериментальных данных, используемых для валидации ПО КМ, а также описание каждой ЭУ, на которой проводились эксперименты, используемые для

валидации ПО КМ, со ссылкой на источники информации, где эти описания приведены подробно (должна быть дана ссылка на сертификат ЭУ).

7.5.2 В случае если ЭУ не сертифицированы, должно быть дано их описание.

В описании ЭУ приводятся:

- принципиальная схема, обеспечивающая понимание сути эксперимента, испытания, явления и т. п., с указанием, какие явления и процессы моделируются на ЭУ и как;
- перечень и диапазоны измеряемых параметров;
- погрешности их измерения.

7.5.3 Если для валидации ПО КМ не использованы экспериментальные данные, этому факту должно быть дано соответствующее обоснование, то есть показано, что экспериментального обоснования не требуется (например, ПО КМ реализует аналитическое решение, экспериментов не существует по объективным причинам, которые должны быть приведены, и т. д.).

7.6 В разделе «Результаты валидации ПО КМ» должны быть приведены результаты валидации ПО КМ и их анализ.

7.6.1 В качестве результатов валидации ПО КМ и их анализа приводят:

- результаты сопоставлений расчетов, выполненных с помощью зафиксированной версии ПО КМ, и данных экспериментов и/или расчетных тестов (они должны быть ясно изложены с обоснованием и оценкой достоверности сопоставления. Следует указывать, в какой области не получено удовлетворительного совпадения результатов расчетов с применением ПО КМ и экспериментов и/или расчетных данных);
- обоснование полноты и достаточности проведенных сопоставлений (должны быть приведены результаты статистического анализа сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей, дана количественная оценка расхождения или экспериментальных и расчетных данных, приведена погрешность расчетных параметров в заявленной области режимов и/или состояний объекта, приведены доказательства применимости ПО КМ для моделирования объекта (и/или его элемента).

7.6.2 Результаты сопоставления данных, рассчитываемых с помощью ПО КМ, и данных экспериментов и/или расчетных тестов должны быть приведены на одном рисунке в одинаковом масштабе. Представление результатов в виде цветовой палитры допускается только для демонстрации графических возможностей ПО КМ.

7.6.3 Для ПО КМ, используемого для расчетов в обоснование работоспособности объекта, должна быть указана и обоснована степень выполнения законов сохранения в случае их применимости. Для ПО КМ, предназначенного для проектных и/или эксплуатационных расчетов, должны быть указаны погрешности определения расчетных параметров.

7.7 В разделе «Перечень источников» должен быть представлен перечень имеющих официальные выходные данные документов (опубликованные материалы, отчеты организаций, официально зарегистрированные протоколы, проектная, конструкторская и эксплуатационная документация, сертификаты и т. п.), использованных для валидации ПО КМ, в том числе требуемых для формирования блока исходных данных и выполнения расчетов.

7.8 В приложении к отчету о валидации ПО КМ могут быть представлены дополнительные материалы, необходимые для обеспечения полноты информации, приведенной в отчете о валидации ПО КМ.

7.9 Допускается включение в отчет о валидации ПО КМ дополнительной информации, являющейся существенной (по мнению заявителя ПО КМ) для обоснования работоспособности ПО КМ и заявленных характеристик ПО КМ.

Приложение А
(рекомендуемое)

Рекомендуемый вид отчета о валидации

1 Верификация расчетной методики.
2 Описание валидационных тестов.
3 Описание экспериментальных установок и представление экспериментальных данных.
4 Результаты валидации ПО КМ.

Таблица А.1

Название теста	Название параметра	Эталонное значение	Полученное значение	Вывод

5 Перечень источников.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Пояснение терминов, используемых в стандарте

Б.1 Число Маха M определяется соотношением

$$M = |V| / c. \quad (Б.1)$$

Здесь $|V|$ — модуль местной скорости среды, c — местная скорость звука в среде.

Б.2 Динамический коэффициент вязкости μ определяется соотношением

$$\hat{\tau} = \mu\left(2\hat{S} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot V)\hat{I}\right). \quad (Б.2)$$

Здесь $\hat{\tau}$ — тензор вязких напряжений, $\hat{S}$ — тензор скоростей деформации, V — местная скорость среды (вектор), $\hat{I}$ — единичный тензор.

Б.3 Тензор скоростей деформации в декартовой системе координат определяется соотношением

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)_{i,j}. \quad (Б.3)$$

Здесь S_{ij} — произвольная компонента тензора скоростей деформации, V_i — произвольная компонента вектора скорости, x_j — произвольная координата.

Библиография

[1] Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. — 352 с.

[2] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

[3] Лойцянский Л.В. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1987. — 840 с.

[4] Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. — Т. 2. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. — 727 с.

[5] Douglas J.F., Gasiorek J.M., Swaffield J.A., Jack L.B. Fluid Mechanics // Pearson Education Limited, 2005. — 958 p.

[6] White F.M. Fluid Mechanics. 4th Edition // McGraw-Hill Book Co. — Boston, 1999. — 826 p.

[7] Qu´er´e P., Weisman C., Paill´ere H., Vierendeels J., Dick E., Becker R., Braack M., Locke J. Modelling of natural convection flows with large temperature difference: a benchmark problem for low Mach number solvers. Part 1. Reference solutions // ESAIM: M2AN ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis. — Vol. 39. — № 3, 2005 — pp. 609—616.

[8] Lane J.C., Loehrke R.I. Leading Edge Separation from a Blunt Plate at Low Reynolds Number // Transactions of ASME. — Vol. 102, 1980. — pp. 494—496.

[9] Armaly B., Durst F., Pereira J., Schönung B. Experimental and theoretical investigation of a backward-facing step // Journal of Fluid Mechanics. — Vol. 127, 1983. — pp. 473—496.

УДК 519.642.2:006.354 ОКС 35.020

Ключевые слова: моделирование, численное моделирование, физические процессы, ламинарное течение, валидация, тестирование, гидродинамика, ламинарные течения

БЗ 1—2018/85

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Р. Ароян*
Компьютерная верстка *Ю.В. Половой*

Сдано в набор 07.02.2018. Подписано в печать 13.03.2018. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,68 Тираж 22 экз. Зак. 420.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123001. Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru