

ООО «СИТИС»
ТР – 5094

**ASME V&V 20-2009
СТАНДАРТ ПО
ВЕРИФИКАЦИИ
И ВАЛИДАЦИИ В
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ГИДРОДИНАМИКЕ
И ТЕПЛООБМЕНЕ**

Американский национальный стандарт

American National Standard
ASME V&V 20-2009

Standard for Verification and Validation in
Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В МЕТОДОЛОГИЮ ВАЛИДАЦИИ	6
1-1 Общие положения	6
1-2 Цели и область применения	6
1-3 Ошибки и неопределенность	6
1-4 Пример для номенклатуры валидации и подход	7
1-5 Метод валидации	7
1-6 Обзор следующих глав	10
1-7 Список литературы	10
ГЛАВА 2. ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕШЕНИЯ	11
2-1 Общие положения	11
2-2 Введение	11
2-3 Верификация кода	12
2-4 Верификация решения	16
2-5 Отдельные вопросы	21
2-6 Итоговый комментарий	22
2-7 Список литературы	22
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ	24
3-1 Введение	24
3-2 Метод коэффициента чувствительности (локальный) для распространения неопределенности параметров	24
3-3 Пробные (общие) методы для распространения параметров неопределенности	28
3-4 Факторы значимости	31
3-5 Отдельные вопросы	31
3-6 Итоговый комментарий по неопределенности параметров	32
3-7 Список литературы	32
ГЛАВА 4. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	33
4-1 Обзор	33
4-2 Анализ экспериментальной неопределенности	33
4-3 Неопределенность эксперимента валидации	34
4-4 Выводы	34
4-5 Список литературы	35
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВАЛИДАЦИИ	35
5-1 Обзор	35
5-2 Оценка u_{val} когда экспериментальное значение D переменной валидации определяется прямым измерением (пример 1)	35
5-3 Оценка u_{val} когда экспериментальное значение D переменной валидации определяется из уравнения сокращения данных (примеры 2 и 3)	37
5-4 Оценка u_{val} когда экспериментальное значение D переменной валидации определяется из уравнения сокращения данных, которое само является моделью (пример 4)	43
5-5 Предположения и вопросы	44
5-6 Список литературы	46
ГЛАВА 6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВАЛИДАЦИИ	47
6-1 Введение	47
6-2 Интерпретация результатов валидации с использованием E и u_{val} без предположений о распределениях ошибок	47
6-3 Интерпретация результатов валидации с использованием E и u_{val} с предположениями о распределениях ошибок	47
6-4 Список литературы	48
ГЛАВА 7. ПРИМЕРЫ	48
7-1 Обзор	48
7-2 Пример верификации кода	48
7-3 Пример валидации	55
7-4 Список литературы	76
ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ I. ДЕТАЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИМЕРА ЗАДАЧИ	77
ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ II. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	81
НЕОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ А. МЕТОД ПРОИЗВЕДЕННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРИМЕРА ЗАДАЧИ	83
НЕОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПОКАЗАТЕЛИ ВАЖНОСТИ ПАРАМЕТРОВ	89
НЕОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ С. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕМАТИКИ	93

Дата выпуска: 30 ноября 2009

Настоящий стандарт будет пересмотрен, когда Общество утвердит выпуск новой редакции. Дополнения, к настоящему изданию выпущены не будут.

ASME публикует письменные ответы на запросы, касающиеся интерпретации технических аспектов настоящего стандарта. Периодически некоторые действия Комитета ASME V & V 20 могут быть опубликованы как Случаи. Случаи и интерпретации публикуются на веб-сайте ASME в Страницах Комитета <http://cstools.asme.org> по мере их выхода.

ASME – это зарегистрированная торговая марка Американского общества инженеров-механиков.

Настоящий стандарт был разработан в соответствии с процедурами, отвечающими критериям Американских Национальных Стандартов. Комитет по стандартам, который утвердил настоящие нормы или стандарт был урегулирован, чтобы гарантировать, чтобы люди из компетентных и заинтересованных кругов имели возможность принимать участие в его разработке. Представленный стандарт был опубликован для общего обсуждения и критики, что дает возможность дополнительного общественного вклада из области промышленности, научных кругов, регулирующих органов и общественности в целом.

В сферу деятельности ASME не входит утверждение, оценка или одобрение объектов, сооружений, приборов или деятельности.

ASME не берет на себя обязательств относительно действительности любых патентных прав, заявленных в связи с какими-либо объектами, упомянутыми в настоящем документе, и не берет на себя обязательств по предотвращению использования стандарта кем-либо с нарушением любых патентов и не берет на себя такую ответственность. Пользователям стандарта сообщается, что определение действительности любых таких патентных прав, а также риск нарушения таких прав, полностью является их собственной ответственностью.

Участие представителя (ей) федерального агентства или лица (лиц), входящих в ассоциацию промышленности не должно толковаться как государство или отрасль одобрения этого стандарта.

ASME принимает на себя ответственность только за толкование настоящего документа, выпущенного в соответствии с установленными процедурами и правилами ASME, что исключает публикацию его толкований третьими лицами.

Никакая часть этого документа не может быть воспроизведена в любой форме, в электронную поисковую систему или иным образом, без предварительного письменного разрешения издателя.

Американское общество инженеров-механиков
Three Park Avenue, Нью-Йорк, Нью-Йорк 10016-5990

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем стандарте рассматривается верификация и валидация (V & V) в вычислительной гидродинамике и теплообмене. Задача верификации и валидации заключается в оценке точности вычислительного моделирования. Процедуры верификации и валидации, представленные в настоящем стандарте, могут быть применены к задачам по инженерному и научному моделированию, начиная по сложности от простых сосредоточенными массами, к 1-D устойчивых ламинарных потоков, чтобы 3-D нестационарного турбулентного химически реагирующих смесей газов. В верификации и валидации, конечной целью инженерных и научных интересов является валидация, которая определяется как процесс определения степени, в которой модель является точным представлением о реальном мире с точки зрения предполагаемых целей применения модели. Однако валидации должна предшествовать верификация норм и решений. Верификация норм устанавливает, что нормы точно решают математическую модель, включенную в нормы, то есть о том, что нормы не содержат ошибок для интересующего моделирования. Верификация решений оценивает численную точность конкретного расчета.

Оценка ряда, в пределах которого находится ошибка моделирования, является основной задачей процесса валидации и осуществляется путем сравнения результата моделирования (решения) с соответствующими экспериментальными результатами (данными) для указанных переменных валидации при указанном наборе условий. Валидация не может состояться без экспериментальных данных, с которыми необходимо сравнивать результаты моделирования. Как правило, попытки валидации будут охватывать целый ряд условий в интересующей сфере.

Как Американский институт аэронавтики и астронавтики (AIAA) так и Американское общество инженеров-механиков (ASME), опубликовали руководства по валидации и верификации, которые представляют философию и процедуры создания всеобъемлющей программы валидации, однако оба используют определения ошибки и неопределенности, которые не продемонстрированы в руководстве, чтобы обеспечить количественную оценку сравнения переменных валидации, спрогнозированные моделированием и определенных экспериментально. Например, ASME V & V 10-2006, определяет ошибку как «распознанную погрешность на любом этапе или действии моделирования или экспериментов, произошедшей не по причине недостатка знаний» и дает определение неопределенности как «потенциальной погрешности в любом этапе или действии моделирования, расчете или процессе эксперимента, который связан со свойственной изменчивостью или недостатком знаний».

В отличие от этих определений, настоящий стандарт представляет подход верификации и валидации, основанный на понятиях и определениях ошибок и неопределенности, которые прошли международную кодификацию экспериментальной сообществом в течение нескольких десятилетий. В 1993 году Руководство по выражению неопределенности измерений было опубликовано Международной организацией по стандартизации (ISO) под своим именем и шести других международных организаций.* Согласно предисловию к Руководству ISO, «В 1977 году, признав отсутствие международного соглашения по выражению неопределенности в измерениях, высшим органом в мире в области метрологии, Международный комитет де мер и весов (CIPM), сделал запрос Международному бюро мер и весов (BIPM) для решения этой проблемы в сочетании с лабораториями национальных стандартов и сделать рекомендацию». После нескольких лет попытки это привело к передаче обязанности технической консультативной группе ISO по метрологии, Рабочей группе 3, разработать руководящий документ. В результате было опубликовано Руководство ISO, которое было принято как международный стандарт де-факто для выражения неопределенности в измерениях.

* Подразумевается во фразе «реальный мир», используемой в определении валидации.

* Международное бюро мер и весов (**BIPM**), Международная электротехническая комиссия (**IEC**), Международная федерация клинической химии (IFCC), Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC), Международный союз теоретической и прикладной физики (**IUPAP**) и Международная организация законодательной метрологии (**OIML**)

Подход верификации и валидации, представленный в данном стандарте, применяет эти понятия к ошибкам и неопределенностям в экспериментальной результате, а также ошибок и неопределенности в результате от симуляции. Таким образом, неопределенность в экспериментально полученным значением и в значении моделирования рассматриваются используя тот же процесс. Используя подход Руководства ISO, для каждого источника ошибок (кроме ошибки имитационного моделирования) стандартный неопределенности, и, по оценкам, такие, что и есть стандартное отклонение генеральной совокупности возможных ошибок, из которых текущая ошибка является одной реализация. Это позволяет оценка диапазоне, в пределах которого моделирование ошибка моделирование лежит.

Целью настоящего стандарта является спецификация проверки и апробирования подхода, который дает количественную оценку степени точности, выведенную из сравнения решения и данных для указанной переменной в заданной точке проверки. Сфера действия этого стандарта является количественная оценка степени точности для случаев, в которых условия фактического эксперимента моделируются. Рассмотрение точности результатов моделирования в точках в пределах домена, кроме точек проверки (например, интерполяция / экстраполяции в области проверки) является предметом инженерной оценки, определенной для каждого семейства задач и выходит за рамки настоящего стандарта.

ASME PTC 19.1-2005 "Испытание неопределенности" рассматривается как сопроводительный документ к настоящему стандарту, и предполагается, что пользователь располагает необходимым множеством деталей

для оценки неопределенности в результатах опытов, и они не приводятся здесь повторно. ASME PTC 19.1-2005 иллюстрирует применение методологии Руководства ISO в простых, а также в сложных опытах.

В идеале, как запускается программа верификации и валидации лица, ответственные за моделирование и ответственные за проведение опытов, должны участвовать совместно в разработке попыток верификации и валидации. Переменные значения валидации должны быть выбраны и определены с осторожностью. Каждый измеряемый параметр имеет неотъемлемое временное и пространственное разрешение, а также экспериментальный результат, который определяется из этих измеряемых параметров следует сравнить с прогнозируемым результатом, что обладает тем же пространственное и временное разрешение. Если это не будет сделано, такие концептуальные ошибки должны быть выявлены и устранены или приблизительно на начальных стадиях попыток верификации и валидации, или значительные ресурсы могут быть потрачены впустую, и все усилия могут быть нарушены.

Наконец, в качестве помощи читателю настоящего стандарта представлено следующее руководство к теме и обсуждениям каждого раздела. Рекомендуется, чтобы читатель перешел к началу стандарта в разделе 1 и последовательно читал каждый последующий раздел. Презентация в настоящем стандарте следующим процедуру, начиная с проверки (код и решение), положения параметра оценки неопределенности, экспериментальные оценки неопределенности, валидации моделирования, и заканчивая комплексным примером задачи. Как уже говорилось, настоящий стандарт следует общему порядку; однако, каждый раздел настоящего стандарта можно также рассматривать как отдельную часть по отдельной тематик. Цель настоящего документа состоит в проверке, в которой неопределенность определяется как для экспериментальных данных, так и для моделирования опытов. Однако материалы разделов 2, 3 и 4 могут изучаться независимо от остального документа, поскольку они играют важную самостоятельную роль. Руководство для читателя построено следующим образом:

Раздел 1 представляет собой введение в концепции верификации и валидации, определений ошибок и неопределенности, и введение общей методологии проверки и подхода, как это определено в настоящем стандарте. Ключевыми понятиями данного раздела являются проверка ошибки сравнения и стандарт проверки неопределенности. Показано, что стандартная проверка неопределенности является функцией трех стандартных неопределенностей, связанных с ошибками из-за численного решения уравнений, в связи с входами моделирования, и в связи с экспериментальными данными.

Раздел 2 представляет две ключевые темы:

(а) детали метода для верификации норм, основанной на методе производимых решений

(б) детали метода для проверки решение, основанное на технике Индекса конвергенции сетки (расширенные данные экстраполяции Ричардсона).

Исход раздела 2 представляет собой метод оценки стандартной неопределенности, связанной с численных ошибок.

В разделе 3 представлены два различных подхода к оценке стандартной неопределенности, связанной с ошибками в моделировании входных параметров. Один подход оценивает отклик моделирования или системы в локальной окрестности входного вектора, а другой подход оценивает отклик в большем глобальной районе. Первый подход, как правило, называют, например, методом коэффициента чувствительности, второй подход, как правило, называют методом выборки или методом Монте-Карло.

Раздел 4 представляет краткий обзор метода, изложенного в ASME PTC 19.1-2005 Тест неопределенности стандарта для оценки неопределенности в экспериментальном результате. В заключение этого раздела, читатель будет иметь методы для оценки ключевых неопределенностей, необходимые для завершения оценки проверки.

Раздел 5 представляет два подхода к оценке стандартной проверки неопределенность учитывая оценки неопределенности, связанные с численными, ввод и экспериментальных ошибок в данных, разработанные в трех предыдущих разделах. В заключение этого раздела, читатель будет иметь необходимые инструменты для оценки стандартной проверки неопределенность и ошибки, связанные с математической моделью.

Раздел 6 представляет собой обсуждение интерпретации ключевых метрик проверки ошибок сравнения проверка и неопределенности проверки. Показано, что ошибка сравнение проверка является оценкой математического ошибки модели и, что неопределенность проверки является стандартная неопределенность оценки модели ошибки.

Раздел 7 объединяет методы, представленные в предыдущих разделах, реализуя их в всеобъемлющего например проблемы рабочей через каждый элемент общей процедуры и приводит к полной проверки оценки кандидата математической модели.

И, наконец, в данные стандарт включены несколько приложений. Некоторые из них рассматриваются как часть стандарта и как обязательные приложения. Другие приложения считаются необязательными или рассматриваются как дополнения и определены в качестве таковых.

ASME Верификация и валидация 20-2009 был утвержден Комитетом по верификации и валидации 20 (ранее PTC 61) 9 января, 2009 и одобрен Американским национальным институтом стандартов (ANSI) 3 июня, 2009.

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В МЕТОДОЛОГИЮ ВАЛИДАЦИИ

1-1 Общие положения

Настоящий стандарт обращается к верификации и валидации в вычислительной гидродинамике и вычислительная теплопередаче. Обеспокоенность верификации и валидации является оценка точности вычислительного моделирования. Проверка и процедуры проверки представлены в данном стандарте могут быть применены к инженерным и научно моделирования проблем, начиная по сложности от простых сосредоточенными массами в 1-D устойчивого ламинарного течет в 3-D нестационарного турбулентного химически реагирующих течений. В верификации и валидации, конечная цель инженерных и научных интересов является проверка, которая определяется как процесс определения степени, в которой модель дает точное представление о реальном мире с точки зрения целей применения модели. Однако проверка должна предшествовать проверка кода и проверки решения. Верификация устанавливает, что стандарт точно решает включенную в него математическую модель (т.е., стандарт не содержат ошибок для необходимого моделирования). Верификация решения оценивает численную точность конкретного расчета. Верификация стандарта, и верификация решения подробно рассмотрены в Главе 2.

Оценка ряда, в пределах которого находится ошибка моделирования, является основной задачей процесса валидации и осуществляется путем сравнения результата моделирования (решения) с соответствующим экспериментальным результатом (данных) для указанных переменных проверки на указанном наборе условий. *Валидация невозможна без экспериментальных данных, с которыми необходимо сравнивать результаты моделирования*¹ (что подразумевает выражение «реальный мир», используемое в определении валидации).

¹ "Это подразумевается во фразе "реального мира", используемой в определении проверки. Как правило, попытки валидации охватывают целый ряд условий в интересующей области знаний.

1-2 Цели и область применения

Цель настоящего стандарта заключается в спецификации подхода верификации и валидации, который дает количественную оценку степени точности, выведенную из сравнения решения и данных для указанной переменной в заданной точке проверки. Подход, предложенный Коулман и Стерн [1], использует понятия из экспериментального анализа неопределенности [2-4] рассмотреть ошибки и неопределенности в решении и данных.

Область применения настоящего стандарта заключается в количественной оценке степени точности моделирования указанных переменных проверки в указанной точке валидации для случаев, в которых моделируются условия фактического эксперимента. Рассмотрение точности решения в точках в пределах домена, кроме точек проверки (например, интерполяция/экстраполяция в области проверки) является предметом инженерной оценки, определенной для каждого семейства задач и выходит за рамки настоящего стандарта.

Гидродинамика и теплообмен являются областями техники и науки, которые специально рассматриваются, но подход валидации применим в других областях. Обсуждение и примеры сосредоточены на моделях с использованием дифференциальных уравнений в частных, но более простые модели также входят в сферу компетенции подхода валидации.

1-3 Ошибки и неопределенность

Соответствующие определения из метрологии являются:

(а) ошибка (измерения), δ : "Результат измерения минус истинного значения измеряемой величины" [5]

(б) неопределенность (измерения), u : "параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой" [5]

Эти концепции были расширены в [1], чтобы применить к значению переменной раствор из моделирования, а также измеренному значению переменной из эксперимента

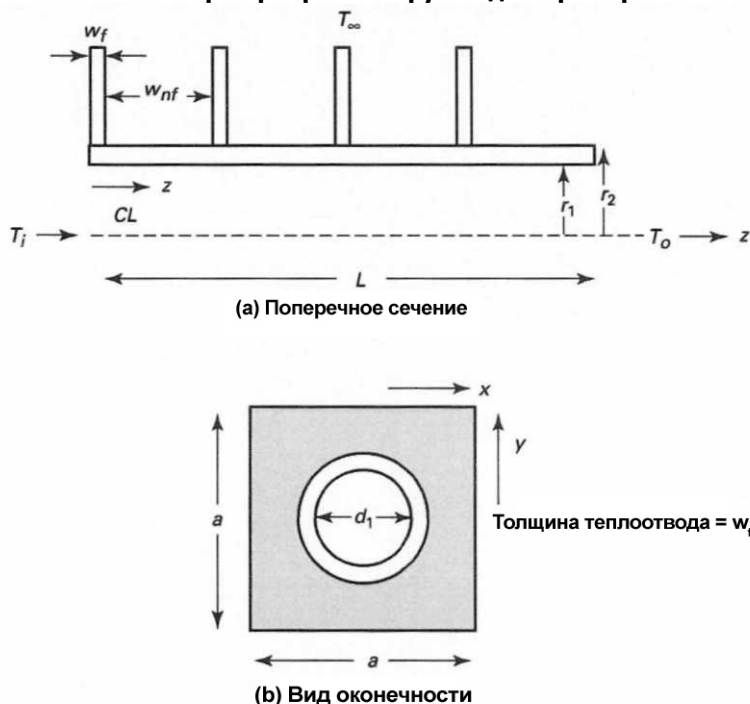
В этом контексте, то, об ошибке, S , является величиной, которая имеет особый знак и величину, а также конкретные ошибки, δ . Разница вызвана источника ошибок δ между величиной (измеренной или смоделированной) и ее истинным значением. В подходе, описанном в данном стандарте, предполагается, что каждая ошибка которого Знак и величина известна была удалена коррекции. Любые оставшиеся ошибки, таким образом, неизвестной знака и величины², и неопределенности u оценивается с идеей, что $\pm u$ характеризует диапазон, содержащий S . В экспериментальной анализа неопределенности [2], и это стандартная неопределенность и соответствует концептуально к оценке стандартное отклонение, σ , родительского распределения, из которых S является одной реализацией. Это важно отметить, что ни предположение о виде распределения родительской не связано с определением u .

² Есть асимметричные ошибки, которые, скорее всего, (или наверняка) имеют один знак, а не другой. Лечение этих либо "нулевой" центрирования или путем оценки неопределенностей асимметричные обсуждается в ссылках [3] и [4].

Понятия верификации и валидации используемых в настоящем стандарте, согласуются с определениями, используемыми в ранее опубликованных руководствах и текстах по верификации и валидации [6-8]. Понятия и определения для ошибок и неопределенности используется здесь отличаются от тех, в ранее опубликованных руководствах, однако. И Американский институт аэронавтики и астронавтики (AIAA) и Американское общество инженеров-механиков (ASME) опубликовало руководства по верификации и валидации [6, 7], что представить философию и процедуры для создания всеобъемлющей программы проверки, но оба определения использования ошибок и неопределенности, которые не продемонстрировали в руководстве, чтобы обеспечить количественные оценки сравнения переменных проверки предсказанных моделирования и определяется экспери-

ментально. ASME V & V 10-2006, например, определяет ошибку как "узнаваемый дефицит в любой фазе или активности моделирования или экспериментов, которая не из-за отсутствия знаний» и определяет неопределенность как "потенциального дефицита в любой фазе или деятельности моделирования, расчет, или процесс экспериментирования, что связано с присущей изменчивости или отсутствие знаний".

Рис. 1-4-1 Схема сборки ребристой трубки для примера теплопередачи



1-4 Пример для номенклатуры валидации и подход

В процессе проверки, результат моделирования (раствор) по сравнению с экспериментальной результате (данных) для указанных переменных проверки на указанном наборе условий (точка проверки). В качестве примера (показанного на рис. 1-4-1), рассмотрим случай полностью развитого течения горячей жидкости внутри круглой трубы. Квадратные ребра прикреплены к наружной стенке трубы для повышения теплопередачу. Проверяющие переменные интересные вниз объемная температура жидкости, T , и скорость потери тепла, q , по длине трубы, L . описание проблемы, соответствующая имитационная модель, и номенклатура представлены подробно в обязательном Приложении I.

Этот пример обсуждается в контексте проверки в разделе 5 для случаев, в которых происходят в следующем.

1-4.1 Пример 1

Переменная проверки, T , непосредственно измеряется.

1-4.2 Пример 2

Переменная проверки, q , определяется с использованием уравнения сокращения данных, которая сочетает несколько переменных из эксперимента как

$$q = \rho Q C_p (T_i - T_o) \quad (1-4-1)$$

и T_i и T_o отдельно измеряется и не имеют общих источников ошибок.

1-4.3 Пример 3

Проверка такая же, как случай 2 в пункте. 1-4,2 выше, за исключением измерений T_i и T_o поделились источники ошибок.

Множество проверки точка находится на числа Рейнольдса определяется как

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi \mu d_i} \quad (1-4-2)$$

Рассмотрим случай 1 в пункте. 1-4.1 выше в качестве примера для описания номенклатуры подход проверки. В эксперименте переменная проверки, T , непосредственно измеряется. При моделировании экспериментально определенные значения T_i , T_o , Q , d_i , d_o , L и эталонные величины ρ , μ , C_p , h , k , α , β и w являются входами модели и значение T прогнозируется. конкретный пункт проверки Re рассчитывается по формуле. (1-4-2).

1-5 Метод валидации

Номенклатура, используемая в подходе проверки представленной в настоящем стандарте приведена на рис. 1-5-1 на примере передачи тепла, описанную в предыдущем пункте.

Обозначим прогнозируемое значение T с моделирования решения как S , стоимости, определенной на основе экспериментальных данных, как D и истинное (но неизвестный) значение как T . (Очевидно, относительных величин S , D и T будет отличаться среди случаев и не обязательно будет в порядке, показанном на рисунке.) Сравнение проверки ошибки³ E определяется как (³ Уравнение (1-5-1) на самом деле определяет E как расхождения, а не ошибкой в этой точке в развитии, но E Показано, что ошибка уравнением. (1-5-6).)

$$E = S - D \quad (1-5-1)$$

Ошибка в значении решения, S , представляет собой разницу между S и истинное значение T

$$\delta_s = S - T \quad (1-5-2)$$

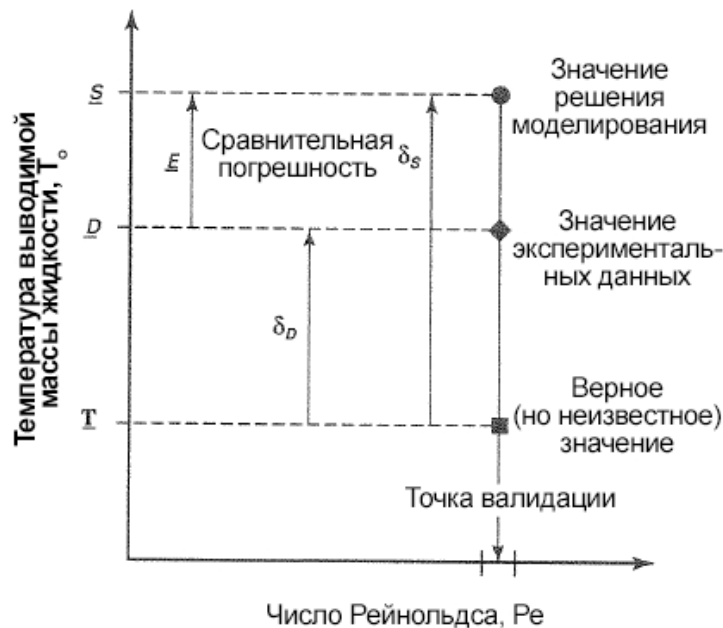
и точно так же ошибка в экспериментальным значением D является

$$\delta_D = D - T \quad (1-5-3)$$

Используя формулы. (1-5-1) до (1-5-3), E можно представить в виде

$$E = S - D = (T + \delta_s) = (T + \delta_D) = \delta_s - \delta_D \quad (1-5-4)$$

Рис. 1-5-1 Схематическое изображение Номенклатура для валидации подхода



Сравнение проверки ошибок E , таким образом, сочетание всех ошибок в результате моделирования и экспериментального результата, а его знак и величина известны после того, как сравнение проверка производится.

ПРИМЕЧАНИЕ: "правда" является значение величины интереса, определенного наблюдателя и является абстракцией. Тем не менее, неполное определение количества приводит к дополнительным неопределенности [2]. В этом стандарте, эксперимент, как перспективе определяется как реальности интерес (правда), и, таким образом условия фактического эксперимента "точка проверка", что моделируется.

Все ошибки в S может быть отнесен к одному из трех категорий [1]:

- (а) ошибка $S_{model} > !$ из-за допущений моделирования и приближений
- (б) ошибка S_{num} из-за численного решения уравнений
- (в) ошибка S_{input} в результате моделирования из-за ошибок во входных моделирование параметров (T , T_x , Q , dv , d , L , p , ft , C_p , h_v , h_j , h_c , k_f , kt , wf и $wilf$ в примере теплопередачи)

Эти S будет определяться в последующих разделах.

Таким образом

$$\delta_s = \delta_{model} + \delta_{num} + \delta_{input} \quad (1-5-5)$$

Цель учений проверки является оценка (S_{model} в пределах диапазона неопределенности.

Ошибка сравнение может быть записана в виде

$$E = \delta_{model} + \delta_{num} + \delta_{input} - \delta_D \quad (1-5-6)$$

Этот подход показан схематически на фиг. 1-5-2, где источники ошибок приведены в овалов. Реорганизация ур. (1-5-6), чтобы изолировать S_{model} дает

$$\delta_{model} = E - (\delta_{num} + \delta_{input} - \delta_D) \quad (1-5-7)$$

Рассмотрим условия, на правой стороне уравнения. После того, как S и D определяются, знак и величина E известны из ур. (1-5-1). Тем не менее, знаки и величины S_{num} , S_{input} и S_D неизвестны. Стандартные неопре-

деленности, соответствующие этим ошибкам являются W_{Num} , и J и OOH (где ip , например, является оценка стандартного отклонения распределения родительской, из которого SD является одним реализация).

ПРИМЕЧАНИЕ: После того, как D и S были определены, их значения всегда отличаются тем же фиксированную сумму от истинного значения. То есть, все ошибки, влияющие на D и S стали "окаменелый" [4] и SD , $S_{\text{прм}}$, S_{NUM} и S_{mi} дкл все систематические ошибки. Это означает, что неопределенности должен быть оценен (σ , i , и \wedge ввода пит IID) систематические стандартные неопределенности. В концептуальном подходе Руководства ИСО [2], нет никаких различий в математической обработки неопределенностей, которые являются "случайными" и те, которые являются «систематическое». Систематическая ошибка является одной реализация от некоторых родительской популяции возможных значений от систематического источника ошибки, и соответствующий систематическое стандартная неопределенность, и, является оценка стандартного отклонения, а, этого родительской популяции.

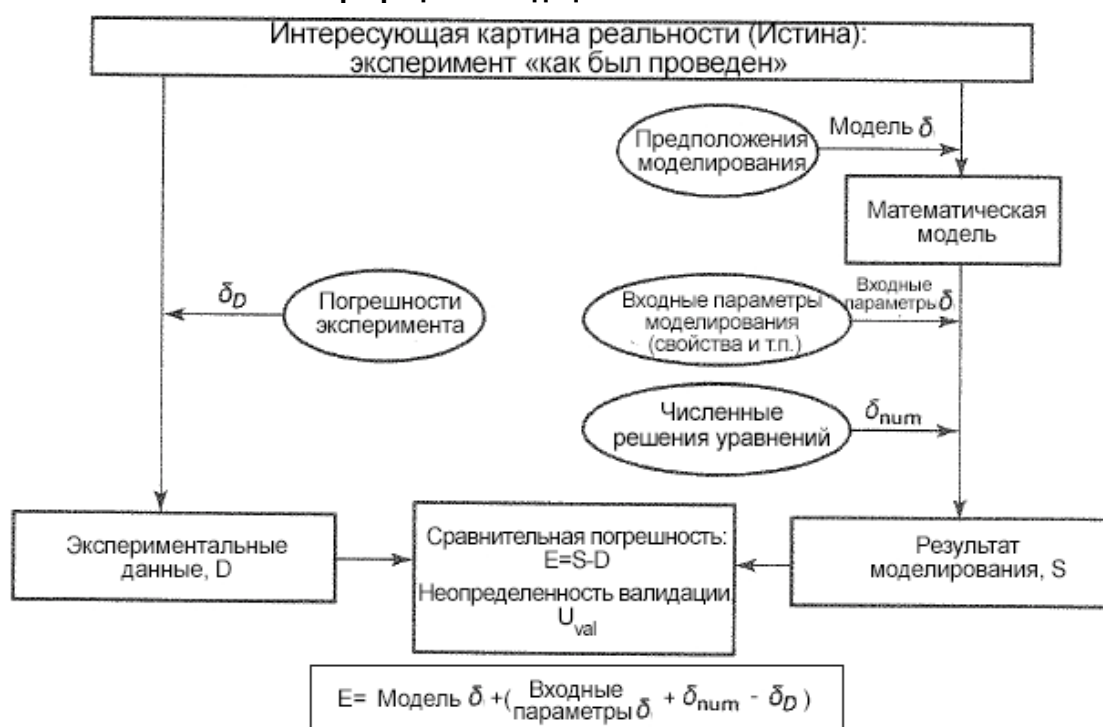
После ссылки [1], стандарт проверки неопределенность, и, может быть определена в качестве оценки стандартного отклонения генеральной совокупности комбинации ошибок ($8_{\text{num}} + 5B_{\text{вводите}} - 8d$). Учитывая, показанное на ур. (1-5-7),

$$(E \pm u_{\text{val}}) \quad (1-5-8)$$

затем характеризует интервал, в течение которого $8_{\text{.}}$ падает, или

$$\delta_{\text{model}} \in [E - u_{\text{val}}, E + u_{\text{val}}] \quad (1-5-9)$$

Рис. 1-5-2 Обзор Процесс валидации с источниками ошибки в овалах



Оценка u_{val} таким образом, в основе методологии, представленной в настоящем стандарте, и E , и «вал являются метрики проверки.

Если три ошибки на правой части уравнения. (1-5-7) фактически независимы, то

$$u_{\text{val}} = \sqrt{u_{\text{num}}^2 + u_{\text{input}}^2 + u_D^2} \quad (1-5-10)$$

Как будет подробно рассмотрен в разделе 5, когда переменная проверки непосредственно измеряется - как T в случае 1 (пункт 1-4.1) пример - предположение о эффективно независимых ошибок, как правило, разумно. Тем не менее, когда переменная проверки определяется с использованием уравнения сокращения данных - как d в случаях 2 и 3 (пункты 1-4.2 и 1-4.3) - экспериментальные QD и прогнозируемые QS значения могут быть функциями общих переменных и $8_{\text{.}}$, и SD не являются независимыми. Эквивалентно уравнению. (1-5-10) показан для этих случаев в разделе 5.

Если, как показано в основной методологии в данном стандарте, неопределенности взносы в $H_{\text{ва}}$ | считаются, что принимать во внимание все источники ошибок в S , 'вход' 5_{NUM} и $S_{\text{пр}}$, то 5_{model} включает только ошибки, связанные с моделирования предположений и приближений ("модель формы" ошибки). На практике существует множество градаций, которые могут существовать в выборе того, какие источники ошибок учтены в $< 5_{\text{прut}}$ и какие источники ошибки определены как неотъемлемая часть S я модель.

Код, используемый часто имеют больше настраиваемых параметров или входных данных, чем аналитик может принять решение об использовании (например, для коммерческого кода). Решение, какие параметры включать в определении компьютерного моделирования (концептуально отдельно от кода) несколько произвольно. Некоторые (даже All4) параметров доступны можно считать фиксированной для моделирования. (4

Если все значения параметров считаются фиксируется в модели, это предел того, что было названо сильным - модельный подход. См. Роуч [8] для дальнейшего обсуждения, истории и последствий для философии научно-го обоснования.) Для например, аналитик может решить для лечения параметры в пакете химии как фиксированные (" проводных ") и, следовательно, не должны рассматриваться при оценке « вход, хотя эти параметры могли бы обращаться и были связаны неопределенности. Дело в том, что компьютерное моделирование, которое оценивается состоит из кода и выбранного количества входов моделирования, которые считаются частью моделирования, в то время как другие входы моделирования имеют неопределенности, которые учитываются в и.. и, таким образом не способствуют SMODE |. Смотри Необязательные Приложение С для соответствующего обсуждения конкретных и общих смыслах модели и параметрических неопределенностей против модельных форм неопределенности.

Это имеет решающее значение в интерпретации результатов работы по аттестации, что эти источники ошибок, которые включены в 5.. и те модели, которые учитываются при оценке Увал быть определена точно и однозначно.

1-6 Обзор следующих глав

Учитывая, показанное на ур. (1-5-10), оценка функции и должны быть сделаны, чтобы получить оценку и, ; оценки должны быть сделаны из стандартных неопределенностей во всех входных параметров, которые способствуют и. и из стандартных неопределенностей в эксперименте, которые способствуют до.

Процессов проверки Код проверки и решения, которые обсуждаются в разделе 2, в результате оценки и. Проверка Код представляет собой процесс определения того, что код математически правильно для моделирования интереса (то есть, он может сходить к правильному решению континуума как дискретизации уточняется). Проверка Код включает оценку ошибки от известного решения бенчмарка. Проверка Решение представляет собой процесс оценки численной неопределенности для конкретного решения проблемы, представляющей интерес. Проверка Решение включает в себя оценку ошибки, а не оценку от известного решения бенчмарка.

Методы оценки u_{input} , стандартной неопределенности в растворе S из-за стандартных неопределенностей в входных параметров моделирования, представлены в разделе 3. Очевидно, оценки стандартных неопределенностей все входных параметров не требуется. Тогда u_{input} определяется из распространения на одно из следующих действий:

(а) с использованием коэффициента чувствительности метода (местные), требуется оценки коэффициентов чувствительности решение моделирование

(б) с использованием в Монте-Карло (выборки, глобальный) метод, который делает прямое использование стандартных неопределенностей входных параметров, что и стандартные отклонения в предполагаемых распределений родитель ошибок населения

Стандартная неопределенность в экспериментальных результатов UD определяется с использованием общепринятых методов [2-4, 9], разработанные международным сообществом в течение десятилетий, и будет обсуждаться в разделе 4 настоящего документа. Оценка UD является стандартная неопределенность подходит для D . Она включает в себя все эффекты усреднения, включает в себя все случайные и систематические составляющих неопределенности, и включает в себя эффекты любых коррелированные экспериментальных ошибок и любые другие факторы, которые влияют D и UD . Как объяснялось ранее, когда D и UD используются в сравнении проверки любые случайные составляющие неопределенности были окаменелые и UD является систематическим стандартная неопределенность.

Оценка UVA | для целого ряда практических ситуациях V & V демонстрируется в разделе 5, а также обсуждение интерпретации результатов работы по аттестации представлена в разделе 6.

Комплексный пример из конца в конец применения методов, описанных в разделах 1 по 6 будет представлен и рассмотрен в разделе 7.

1-7 Список литературы

- | | |
|--|---|
| <p>[1] Coleman, H. W. and Stern, R, "Uncertainties in CFD Code Validation," ASME J. Fluids Engineering, Vol. 119, pp. 795-803, Dec. 1997</p> <p>[2] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (corrected and reprinted, 1995), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995</p> <p>[3] ASME PTC 19.1-2005, Test Uncertainty, 2006</p> <p>[4] Coleman, H. W. and Steele, W. G., Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2009</p> <p>[5] International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, 2nd ed., International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993</p> <p>[6] AIAA G-077-1998, Guide for the Verification and Vali-</p> | <p>[1] Коулман, HW и Стерн, R, " Неопределенности в CFD код проверки, " ASME J. жидкостей инженерии, Vol. 119, стр. 795-803, декабрь 1997 года.</p> <p>[2] Руководство по выражению неопределенности измерений (с поправкой и перепечатано, 1995), Международная организация по стандартизации, Женева, Швейцария, 1995.</p> <p>[3] ASME PTC 19.1-2005, испытания Неопределенность, 2006.</p> <p>[4] Коулман, HW и Стил, РГ, эксперименты, проверки и анализ неопределенности для инженеров, 3-е изд., John Wiley & Sons, Нью-Йорк, 2009.</p> <p>[5] Международный словарь основных и общих терминов в метрологии, 2-е изд., Международная организация по стандартизации, Женева, Швейцария, 1993.</p> <p>[6] AIAA G -077- 1998, Руководство по верификации и</p> |
|--|---|

[7] ASME V&V 10-2006, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics

[8] Roache, P. J., Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Publishers, Albuquerque, 1998

[9] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' — Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method," JCGM 101:2008, France, 2008

валидации вычислительной газовой динамики симуляторы.

[7] ASME V & V 10-2006, Руководство по верификации и валидации в вычислительной механике деформируемого твердого тела.

[8] Роуч, П.Дж., верификации и валидации в области вычислительной науки и техники, Hermosa издателей, Альбукерке, 1998 года.

[9] Объединенный Комитет по Гиды в метрологии, "Оценка данных измерений - Дополнение 1 к "Руководства по выражению неопределенности измерений" - Распространение распределений с использованием метода Монте-Карло ", JCGM 101:2008, Франция, 2008.

ГЛАВА 2. ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕШЕНИЯ

2-1 Общие положения

В этом разделе, в конечном счете, связана с оценкой неопределенности численного решения из-за численной ошибки, обозначается u_{num} в ур. (1-5-10), Раздел 1. До оценки u_{num} необходимо проверить сам код [т. е. определить, что код не содержит ошибок (код проверки)]. Верификация решения является тогда процессом оценки u_{num} .

2-2 Введение

Целью верификации является установить численную точность, независимо от физической (смоделированной) точности, что является предметом валидации. Необходимость требования количественной оценки численного точности впервые была официально утверждена в редакционном программном заявлении от Журнала ASME по механике жидкостей [1], а затем обновляются в двух пересмотренных политических заявлениях [2, 3]. Как описано в разделе 1, проверка стандарта отличается от проверки решений и должна ему предшествовать, хотя обе процедуры используют сетки конвергенции исследования. В целом, код верификации оценивает код правильность и конкретно включает в себя оценку ошибки для известного решения. В отличие от этого, проверка решение включает оценку ошибки, так как точное решение конкретной проблемы, неизвестно. Код и верификация решения математические действия, не заботясь ни за совпадения результатов имитационной модели с физическими данными экспериментов; что является заботой проверки. Однако следует отметить, что решение и его оценка погрешности из решения верификации будет использоваться в процессе проверки. Таким образом, код проверки, решение верификации, и валидация соединены в общий процесс для оценки точности вычисленного решения.

В оставшейся части данной главы 2 предоставляется рекомендуемый подход для успешного завершения кода и верификации решения усилия. верификации код лечится на протяжении подраздела 2-3. верификации раствор обрабатывают в течение подраздела 2-4.

Целью проверки является установление численной точности, независимо от физического (моделирование) точностью, что является предметом проверки. Необходимость требуя количественную оценку численного точности был впервые официально утверждается в редакционной политическое заявления от ASME Журнале жидкостей инженерии [1], а затем обновляются в двух пересмотренных политических заявлениях [2, 3]. Как описано в разделе 1, код проверка отличается от проверки решений и должно предшествовать его, хотя обе процедуры используют сетки конвергенции исследования. В общем, код проверки оценивает код правильность и конкретно включает в себя оценку ошибки для известного решения. В отличие от этого, проверка решения⁵ включает оценку ошибки, так как точное решение конкретной проблемы, неизвестно. Код и проверка решения математические действия, не заботясь ни за совпадения результатов имитационной модели с физическими данными экспериментов; что является заботой проверки. Однако следует отметить, что решение и его оценка погрешности из раствора проверки будет использоваться в процессе проверки. Таким образом, код проверки, проверка раствор, и проверка соединены в общий процесс для оценки точности вычисленного раствора.

⁵ Термин "проверка решение" используется в настоящем стандарте; в других ссылок термин "расчет проверка" также используется меж \neg непостоянно с "проверки решение» и является эквивалентом термин, используемый Фрейтас [2] и в руководстве ASME V & V 10-2006.

Методы проверки, обсуждаемые в данном разделе относятся только к сетки на основе моделирования. К ним относятся, прежде всего, конечных разностей, конечный объем, и методов конечных элементов, в котором дискретные интервалы сетки определяются между вычислительными узлами. Сетки могут быть неструктурированной или структурированной (в том числе неортогональными граничных оборудованная сеток), двумерные или трехмерные, четырехугольные (или шестигранные), или треугольной (или четырехгранные) и статическим или динамическим⁶.

⁶ Динамические методы сетки включают адаптивный, лагранжиан, или произвольное Лагранжа Эйлера. Бесплатные Лагранжа методы, такие как дискретного вихря и дискретных методов элементов могут также использовать подход, определенный в данном разделе, где Лагранжа маркеры и начальное распределение

можно рассматривать как аналог сетки \rightarrow дисплея вклад. Основываясь на первоначальном распределении лагранжевых маркеров, стратегия уточнения может быть развернута для определения «сетки» CONVER \rightarrow заказ GENGE и оценку неопределенности.

В оставшейся части этого раздела 2 предоставляет рекомендуемый подход для успешного завершения кода и проверки решения усилия. Проверка Код лечится на протяжении подраздела 2-3. Проверка раствор обрабатывают в течение подразделе 2-4.

2-3 Верификация кода

Проверка Код, установления правильности самого кода, может быть сделано только путем систематических испытаний дискретизации конвергенции и мониторинга сходимости решений по отношению к известному решению "базового" (т.е., эталон для сравнения). Лучшее решение эталоном является точное аналитическое решение (т.е. решение выражается в простых примитивных функций, как грех, EXP, TANH и т.д.). Кроме того, оно не является достаточным, что аналитическое решение, если быть точным; необходимо также, что структура решение быть достаточно сложным, что все слагаемые в правящей уравнения (ы) кода тестируемой осуществляются.

Восприятие может существовать, и часто говорится в исследование журнальных статей, что общая проверка точности кодов для сложных проблем (например, полных уравнений Навье-Стокса динамики жидкости) не представляется возможным, потому что точные решения существуют только для относительно простых проблем, которые не в полной мере осуществлять код. Это восприятие привело к случайным и зачастую фрагментарный подход к верификации кода. В действительности, существует систематический подход, основанный на сетевых конвергенции тестов, которая является и сговорчивым и эффективным (п. 2-3.3). Некоторые методы моделирования, такие как крупных вихрей (LES) и прямого численного моделирования (DNS) может привести к возникновению ряда проблем в использовании сетки сходимости для оценки точности кода, но принципиально подход обсуждается в настоящем стандарте, могут быть применены (см. подраздел 2-5 для дополнительного обсуждения).

2-3.1 Требования к верификации кода

Процесс разработки компьютерной код для нелинейных дифференциальных уравнений (PDE) обязательно включает в себя много испытаний и оценки алгоритмов и кодирования. Главным образом, это выполняется для множеств упрощенных проблем с аналитическими решениями. Например, 3-D зависит от времени полностью нелинейный код Навье-Стокса, вероятно, были протестированы на простой 1-D линейного уравнения адвекции-диффузии, в 2-D или 3-D Бюргерса и других подобных проблем. Эти испытания являются полезными в установлении производительность кода, и классические аналитические решения для ограниченных проблем (например, теплопроводности) иногда может предоставить убедительные доказательства для проверки кода. Для более общих проблем (например, Рейнольдсу Усредненные коды Навье-Стокса), в то время как эти разрозненные аналитические решения, принятые вместе могут представлять собой частичную или неформальную верификацию кода, они часто недостаточно убедительно продемонстрировать, что код правильный для целевых задач.

Для достижения убедительного подтверждения кода, необходимо точное аналитическое решение или семейство решений, который осуществляет все необходимые черты кода (например, переменных свойств, нелинейности, модель турбулентности и т.д.). Хорошо известно, что даже ламинарные уравнения Навье-Стокса не знали аналитические решения для любого, кроме самых тривиальных граничных и начальных условий. К счастью, очень общая процедура существует для генерации точных аналитических решений, необходимых для точности проверки кодов. Эта процедура, метод, изготовленных решений (MMS), описан в подразделе 2-3.3.

В современном сообщества моделирования, многие инженеры используют коммерческие инструменты, предоставляемые поставщиком. В общем, сообщество продавец пыталась решить проверки кода, и многие протоколы контроля качества последующих программного обеспечения для решения точности кодирования. Тем не менее, CFD / CHT (динамика вычислительных жидкости / вычислительная теплопередачи) научное сообщество было установлено, что документация проверки кода предоставляется пользователям продавцами часто оказывается недостаточным. Поэтому коммерческих пользователей код предупредили не полагаться на проверку поставщика кода. Пользователь должен признать, что, несмотря на то, коммерческий код, возможно, пользовался широкое применение и даже проверку для некоторых проблем, код может не были проверены для конкретных проблемах, которые пользователь намерен решить. Это всегда полезно получить от поставщиков Имеющаяся документация на их проверки кода, но она также рекомендуется, чтобы пользователь выполнить проверку кода самостоятельно.

2-3.2 Комбинации опций кода

Практические трудности, вытекающие из большого числа вариантов входа пользователей и комбинаций широко известны, но из десяти преувеличенной, как обсуждалось на Роуч [4]. Вкратце, комбинации опций счетны, и пессимистические информатика выводы о сложных кодах, находящихся непроверяемый основаны на нереалистичных условиях, таких как "произвольной сложности." Кроме того, число комбинаций опций, необходимых часто может быть значительно сокращена "разбиения вариант матрицы" [4] на основе здравого смысла и знания структуры кода (философии "стеклянный ящик" [5], в отличие от более требовательных "черный коробка философия »). В противном случае, коды могут быть проверены только для подмножества комбинаций опций. На самом деле, это самый практичный подход, чтобы взять для коммерческого потребителя кода. Общность подхода MMS описанной следующий будет уменьшить эти трудности, связанные с сложно-

сти вариант, потому что меньше тестирование будет необходимо для каждой комбинации опций по сравнению с менее формализованный подход к верификации кода.

2-3.3 Метод производимых решений (MMS)

Способ выпускаемой растворов (MMS) [4-8] обеспечивает методологию для проверки кода, который был успешно продемонстрирована в различных кодах. Он применим к кодов, основанных на решении дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений (обычно, нелинейных систем уравнений) - предмет данного документа и многое из вычислительной науки и техники. Для некоторых математических моделей, метод может быть создана без специальных требований кода, но в данном разделе будут определены наиболее общим и простой в применить подход, который требует возможностей кода, которые не могут быть уже встроены в компьютерном коде (т.е., способность включать пользовательские написанные подпрограммы и возможность обрабатывать условия исходные и неоднородных краевых условиях). Следующее обсуждение MMS отдается дать общее представление о методе; подробные примеры реализации метода приведены в Необязательные Приложении А для задачи теплопроводности.

Как отмечалось ранее, код верификации требует точного, аналитического решения нетривиальной задачи, которая охватывает те же параметры, что проблема будет в конечном итоге обратился с проверенной кода. Формулировка точной, аналитическое решение может показаться трудным для нелинейных систем уравнений в частных производных, но на самом деле это довольно легко. MMS начинается в конце, с достаточно сложной форме раствора (например, гиперболические касательных или других трансцендентных функций). Линеарное решение, однако, не будет осуществлять условия в наших уравнений в частных производных. Кроме того, Тань легко вычисляется и дифференцированы, и содержит все заказы производных (другие функциональные формы обладают также этот атрибут). Можно использовать TANH или другой нефизическую аналитическое решение, или физически реалистичное решение (приближенное решение физической задачи) в методе MMS тех пор, пока достаточно сложность встроены в функциональной форме.

2-3.3.1 Простой 1-D Пример MMS. Чтобы подчеркнуть общность концепции MMS, как и в работах [4,6,7] пример решение выбрано до управляющие уравнения задаются. Тогда же решение может быть использовано для различных задач, где проблема состоит из набора руководящих уравнений в частных производных и граничных условий. Выбранное решение $V(t, x)$ в этом примере заключается в следующем:

$$V(t, x) = A + \sin(B), \quad B = x + Ct \quad (2-3-1)$$

Это 1-D переходный раствор наносят на нелинейного уравнения Бюргерса, часто воспринимается как модельной задачи для развития CFD алгоритма [4].

$$\partial v / \partial t = -v \partial v / \partial x + \alpha \partial^2 v / \partial x^2 \quad (2-3-2)$$

или, используя более компактную нотацию индекс, чтобы указать, частные производные,

$$v_t = -vv_x + \alpha v_{xx} \quad (2-3-3)$$

Кстати, это указано решение $V(t, x)$ является точным решением для постоянной скоростью уравнения переноса с краевым условием $V(t, 0) = A + \sin(B)$ (CF). Однако физическая реализм решения, выбранного для MMS не имеет отношения к процессу код верификации. Все, что требуется решения является то, что быть нетривиальным, и что он воспользуется своим вычислительный алгоритм надлежащим образом.

Источник термин $Q(t, x)$ определено, что, при добавлении к уравнению Бюргерса для $V(t, x)$, производит решение $V(t, X) = V(t, X)$. Уравнение Бюргерса написано как оператор (нелинейной) от V ,

$$L(v) \equiv v_t + vv_x - \alpha v_{xx} = 0 \quad (2-3-4)$$

Тогда функция источника Q , которая производит V по работе на V с L оценивается.

$$Q(t, x) = L[V(t, x)] = \partial V / \partial t + V \partial V / \partial x - \alpha \partial^2 V / \partial x^2 \quad (2-3-5)$$

По элементарных операций с выпускаемой решения $V(t, x)$ заявил в уравнении. (2-3-1),

$$Q(t, x) = C \cos(B) + [A + \sin(B)] \cos(B) + \alpha \sin(B) \quad (2-3-6)$$

Если модифицированное уравнение теперь решена

$$L(v) \equiv v_t + vv_x - \alpha v_{xx} = Q(t, x) \quad (2-3-7)$$

или

$$v_t = -vv_x + \alpha v_{xx} + Q(t, x) \quad (2-3-8)$$

с совместимыми начальными и граничными условий, точное решение модифицированной задачи будет $V(t, x)$ определяется формулой. (2-3-1).

Начальные условия, очевидно, просто $y(0, x) = V(0, x)$ во всем мире. Краевые условия определяются из изготовленного раствора $V(t, x)$ определяется формулой. (2-3-1). Заметим, что область решения даже не указано, как еще. Чтобы рассматривать обычную модель $0 \leq x \leq 1$ или что-то вроде $-10 \leq x \leq 100$, то же экв решения. (2-3-1) относится, но, конечно, граничные значения определяются в соответствующих местах в x . Отметим также, что тип граничного условия еще не был указан. Этот аспект методологии часто вызвал замешательство. Общеизвестно, что различные граничные условия на ФДЭ производить различные ответы, но не все сразу признается, что то же самое решение $V(t, x)$ могут быть получены путем более одного множества гра-

нических видов условий. Следующие комбинации притока (слева границу, например, $x = 0$) или отток (например, $x = 1$) граничные условия будут производить тот же решение $V(T, X)$ по области $0 \leq x \leq 1$.

Дирихле-Дирихле:

$$v(t, 0) = V(t, 0) = A + \sin(Ct) \quad (2-3-9)$$

$$v(t, 1) = A + \sin(1 + Ct) \quad (2-3-10)$$

Дирихле - Отток Градиент (Нейман):

$$v(t, 0) = V(t, 0) = A + \sin(Ct) \quad (2-3-11)$$

$$\partial v / \partial x | (t, 1) = \cos(1 + Ct) \quad (2-3-12)$$

Робин (смешанный)-Отток Градиент (Нейман):

$$av + b \partial v / \partial x = c \quad \text{at} \quad (t, 0). \quad \text{При условии, что } a \text{ и } b, \text{ выбрать}$$

$$c = a[A + \sin(Ct)] + b \cos(Ct) \quad (2-3-13)$$

$$\partial v / \partial x | (t, \pi) = \cos(\pi + Ct) \quad (2-3-14)$$

За это время зависит от решения, граничные значения зависят от времени, а также. Он также будет воз- можно изготовление зависящие от времени решения с устойчивыми граничных значений, при необходимости с помощью кода. В работе [7], то же решение применяется к новой и более сложной Бюргерса- как PDE, кото- рая может быть кандидатом на 1-D турбулентности композицию на основе длины концепции смешивания. Третий пример в [7] использует физически нереальный производства раствора; Другие примеры приведены в ссылках [4, 8].

2-3.3.2 Общий оператор Постановка MMS. В общем подходе MMS, проблема написано символически как нелинейный (системы) оператор L ,

$$L[f(x, y, z, t)] = 0 \quad (2-3-15)$$

Выберите производства решение и обозначим его через M .

$$f = M(x, y, z, t) \quad (2-3-16)$$

Проблема будет изменен на новый оператор, L' , такой, что решение

$$L'[f(x, y, z, t)] = 0 \quad (2-3-17)$$

точно изготовлены решение M . Основной и наиболее простой подход состоит в определении L' , добавив исходный термин к исходной задаче.

$$L'[f] = L[f] - Q \quad (2-3-18)$$

Требуемый срок источником оценивается путем передачи производства M раствора через оператора, L .

$$Q = L[M] \quad (2-3-19)$$

Таким образом, вместо решения исходной задачи $L(F) = 0$ с неизвестным решения, $L(e) = Q$ [или, что эк- вивалентно, $L(\text{если}) = 0$], который имеет известное решение, M , решается. Граничные значения для любого граничного условия для тестирования определяются от производства раствора, M , как и начальные условия.

Вооружившись нетривиальной точного решения, M , можно выполнить сетки тесты конвергенции на код и проверить не только, что она сходится, но и с какой скоростью она сходится. Кроме того, величина (и знак) ошибки непосредственно вычисляется разность между численным решением и аналитического раствора.

Для сложных моделей с большой цепи правилу дифференцирования, компьютер Символическое Манипу- ляция рекомендуется для оценки исходный термин, B . Это даже не нужно смотреть на сложных уравнений сплошной среды, а затем кодировать их. Скорее, можно просто использовать код-записи возможности ком- мерческого символичный код Manipulation производить сегмент исходного кода (в Fortran, C и т.д.) для исход- ного термина.

Для краткости изложения, дальнейшие примеры не представлены в данном разделе на базовой концепции MMS. Тем не менее, подробный пример на легко воспроизведена задачи дается в Необязательные Приложе- нии А. Даже это краткое описание MMS будет достаточно для многих читателей, чтобы начать использовать его, но потенциальный пользователь не может увидеть все последствия на первый взгляд. Многие детали и вопросы рассматриваются в работах [4, глава 3; 6-8].

2-3.3.3 Применение MMS для проверки кодов. После того, как нетривиальная точное аналитическое решение было сформировано, с помощью этого метода выпускаемой решений или, возможно, другой метод, решение в настоящее время используется для проверки кода, выполняя систематические дискретизации те- сты конвергенции (обычно, сетки конвергенции тестов) и мониторинга сходимости как $\chi - \infty$, где χ является мерой дискретизации [например, $A\chi$ (в пространстве), χ (во времени) в конечной разности или конечного кода объема, и размера элемента в конечном кода элемента, числа вихрей в методе дискретных вихрей, количе- ство поверхностных граней в задаче излучения и т. п.].

Основной определение "порядка сходимости" основан на поведении ошибки дискретного решения. Суще- ствуют различные меры ошибка дискретизации E_h , но в некотором смысле это обсуждение всегда ссылкой на

разнице между дискретной Раствор $F\{h\}$ (или его функциональный раствора, например, коэффициента подъемной силы) и точное (континуума) раствор

$$E_h = f(h) - f^{\text{exact}} \quad (2-3-20)$$

Для метода р заказа и хорошо себя проблемы, ошибка в решении ЕН асимптотически будет пропорциональна h^p . Эта терминология относится к «последовательных» методологий метод конечных разностей (FDM), методах конечных объемов (МКО), методов конечных элементов (МКЭ), вихрь в ячейке, и т.д., независимо от гладкости⁷ решения. Таким образом,

⁷ Этот порядок описания конвергенции не будет распространяться на глобальных спектральных методов или р-уточнение МКЭ, но точные решения MMS-прежнему будет полезна для проверки кода.

$$E_h = f(h) - f^{\text{exact}} = C h^p + \text{H.O.T} \quad (2-3-21)$$

где H.O.T. являются члены более высокого порядка. (Для гладких задач, это может быть в принципе можно оценить коэффициент C и горячая от континуума решение, но с практической точки зрения, это не будет сделано в процедуре проверки точности.) Ошибка дискретизации затем контролируют как сетка систематически уточнены. Только уточнение - не последовательны сетки уменьшение в два раза - не требуется. Следует отметить, однако, что для обоснованной оценки p, сетка уточнение не должно быть тривиальным (минимальное значение 1,3 рекомендуется в п. 2-4). Кроме того, тщательное итераций требуется. Теоретически [из уравнения. (2-3-21)], значения $C = E_h / W$ должна стать постоянной, как сетка уточняется для равномерно p-го метода порядка, "равномерно", подразумевая, во всех точках для всех производных. Графическое представление также распространена; наклон E_h против W должно стать постоянным. Примеры будут приведены в разделе 7; Детали и многие другие примеры приведены в [4].

2-3.3.3.1 Различия между наблюдаемыми p и теоретической p. Значение наблюдаемой p сравнении с теоретически ожидаемым значением p дает ценную информацию к численному ошибки в компьютерном коде. Если значения наблюдаемой p и теоретической p сильно различаются друг от друга, то это указывает один из нескольких возможных проблем:

- а) сходимость исследование сетка не была проведена в достаточной степени очистки
- б) имеются более существенные ошибки генерируются в коде, чем те, в связи с дискретизации и, таким образом подробный обзор кода требуется
- в) граничные условия могут не соответствовать (например, некоторые конвективные отток граничные условия, установленные простых вихревых моделей не упорядочены в час, или реализация граничным условием является ущербной, так что мировой порядок зависит, или граничные условия по -ограничивать проблему и распространяться внутрь, тем самым уменьшая наблюдаемый порядок)
- г) начальные условия могут не соответствовать (например, точные сплошной начальные условия могут быть не совместимы с решениями дискретизованных уравнений, или несовместимы с граничными условиями)
- д) неполной итераций и ошибки округления

2-3.3.3.2 Проверка систематической сетки конвергенции теста. Наконец, когда систематическое сетка тест конвергенции проверяется (для всех точка за точкой значений), то следующее были проверены:

- а) использовать любое уравнение преобразования (например, или ортогональной граница установлены координаты)
- б) порядок дискретизации
- в) кодирование дискретизации
- г) порядок матрица решений

Как и в любой нетривиальной техники, всегда есть объявление → Дополнительного детали и тонкости в применении, что серьезный пользователь должен быть в курсе. Это справедливо для MMS. Читатель направлено на Необязательные Приложение С для получения дополнительной информации и кратких пунктов, имеющих отношение к расширенному использованию MMS.

2-3.3.4 Сравнения код к коду. Проверка кодов иногда подошел кода в код сравнений. Идея состоит в том, чтобы взять решение (y) ранее проверенной кода в качестве ориентира. Это может быть сделано на двух уровнях приложений:

- а) растворы на определенной сетки
- б) "сетки без" решения (т.е., высокие решения в более высоком разрешении, которые принимаются как хорошие приближения к точным решениям, такие как с прямого численного моделирования)

Первый подход может быть полезным и экономичным, но требует, чтобы оба кода имеют одинаковые дискретизаций: не только во внутренних точках, но и на всех граничных точек. Он также требует точной повторяющийся терпимости конвергенции (в сущности, недалеко от машины нуля конвергенции). На практике, это эффективно, когда новый код должна быть проверена новая версия ранее проверенной кода, и новая версия не изменить любую из дискретизаций. Например, новая версия может содержать новый линейный решатель, или просто использовать новый компилятор или аппаратную платформу (важный и практической ситуации). Такие сравнения можно сделать с успехом даже на очень грубых сетках. Однако, помимо этого ограничены, хотя важное приложение, этот подход не даст весьма убедительные результаты из-за допусков участвующих. Он может быть использован экономически развивать доверие во время программы развития код (даже если эталоном код не использовать одинаковые дискретизаций), но допуски участвующие, как правило, слишком

грубо или большими, чтобы по-настоящему убедительное подтверждение [4].

То же самое следует за вторым подходом. В принципе, это будет работать, если эталоном код были сам тщательно проверена и если решения были действительно "сетка-бесплатно" или решили все соответствующие длины масштабы проблемы (возможно, до вязкой диссипации) как требование прямого численного Симуляторы (DNS). В целом, однако, небольшие ошибки в коде могут быть замаскированы с отсутствием полного согласия в связи с нечеткости тесте. Как и в первом подходе, он может быть использован в экономическом развивать доверие во время программы развития код, но более убедительным и заслуживающим доверия (конечная) код проверка всегда будет достигнута предпочтительного подхода MMS. Обратите внимание, что результаты DNS часто используются как эквивалент "вся-полевых экспериментальных данных", которые затем используются для оценки интеллектуальной производительности масштабных моделей моделирования вихрей Подсечное. Однако это не следует путать с формальной проверки и апробации усилий, как обсуждалось в настоящем стандарте, а скорее представляет собой стратегию разработки новых моделей подсечного масштабные.

Похожие оценки относится к общему подходу валидации по кода в код сравнений. В принципе, можно было бы просмотреть ранее утвержденный код в качестве базового хранилища экспериментальных данных, включая алгоритмы интерполяции (на решения нелинейных уравнений в частных производных). Код эталоном должна быть точной, чтобы стоять; нет ничего, чтобы быть получены путем сравнения с другим кодом, что является всего лишь старый. В исторической практике, сравнения кода в код для проверки и подтверждения кода были заведомо неудовлетворительным. Это более убедительным для выполнения проверки путем прямого сравнения с экспериментальными данными. Для дальнейшей ссылки обсуждение см. [4].

Рассмотренные выше методы не обеспечивают ценную поддержку в развитии компьютерных кодов и моделей. И это подходы, которые должны использоваться регулярно, чтобы поддержать развитию и укреплению кодов. Тем не менее, это не соответствующие методы формальной, убедительной, и документально проверки и апробации усилий.

2-4 Верификация решения

Перед выполнением проверки раствор, предполагается, что код проверка была завершена, и документированы.

Систематическое сетка уточнение является краеугольным камнем процессов контроля как для кодов или растворов [4-9]. В то время как сетка-уточнения исследования в контексте проверки кода дать оценку ошибки, сетка-уточнения исследования, используемые в проверке решения дают лишь оценку ошибки. Наиболее широко используемый метод для получения оценки ошибки является классическим Ричардсон Экстраполяция (RE) [10,11]. С момента своего первого элегантно заявления ее основателя, Л. Ф. Ричардсон, в 1910 году, а затем в 1927 году, этот метод был изучались многими авторами. Его тонкости, подводные камни, и обобщения были исчерпывающе исследована и каталогизированы [4, 9-12]. Обобщенная RE и наименьших квадратов версия [13] имеют более широкое применение в сложных проблем. Есть также одиночные оценками ошибок сетки (в частности, Чжу-Зенкевич оценок) из более специализированного применения [4,14].

Оценки погрешности и оценки неопределенности являются родственными, но не эквивалентны, и путаница является распространенным явлением. Оценка погрешности предназначен для обеспечения улучшения в результате расчета. Например, если результатом расчета для коэффициента теплопередачи с использованием конкретного сетка e и оценка погрешности e , то уточненное значение (ближе к истинному значению $/$) является $e - e$. С другой стороны, (расширенный)⁸ неопределенность оценить UA предназначен для обеспечения заявление, что интервал $/ \pm 11l$ характеризует диапазон, в пределах которого верно (математическое) значение $/$, вероятно, падает, с вероятностью $x\%$.

⁸ С другой стороны, стандартная неопределенность и не имеет уровень вероятности по существу, связанные с ним, пока распределение ошибок не назначен; этот вопрос будет обсуждаться более в разделе 6.

Количественная что вероятность является целью оценки неопределенности. Цель общая неопределенность (для обоих экспериментов и вычислений) является -95% (т.е. -20:1 шансы, что истинное значение футов, на самом деле в интервале $/ \pm 1I95\%$), где $U95\%$ является оценка (расширяется) неопределенность в уровне достоверности 95%. Обратите внимание, что эта цель уровень доверия совместим с диапазоном 2CR для распределения Гаусса, но концепция и полуэмпирические методы, представленные здесь, не зависят от предположения о распределения Гаусса или любой другой дистрибутив.

Оценки неопределенности ($1I95\%$) можно рассчитать по Роуч [4, 14-16] Сетка Конвергенция показателя (GCI).GCI является оценивается 95% неопределенность получается путем умножения абсолютного значения (обобщенного) RE оценкой погрешности (или любой другой упорядоченной ошибок оценки) на эмпирически определяется коэффициентом безопасности, FS. ФС предназначен для преобразования упорядоченный оценку погрешности в оценке неопределенности 95%. (Так как все заказанные оценками ошибок для того же количества будет асимптотически производства того же оценку погрешности, фактор GCI предохранительных Ф могут быть применены к любой из них, по крайней мере, асимптотически; эмпирическая величина Ф была определена из оценок RE.)

Ричардсон Экстраполяция основана на предположении, что дискретные решения, $/$, иметь представление степенной ряд в шаг сетки, h . Если формальный порядок точности алгоритма известно, то метод дает оценку ошибки при использовании решения от двух разных сетей. Если формальный порядок точности не известно, то три различных решения сетки необходимы для определения наблюдаемую порядок сходимости и оценка погрешности. Хотя сетка удвоение (или уменьшение в два раза) часто используется с RE, не требуется [4], а отношение шага сетки, g , может быть любое действительное число. Целое сетка уточнение не требуется; он

имеет преимущество простоты (особенно для местных значений, которые могут быть совместно расположенных в семье сетки), но может вызвать трудности. Например, когда мелкую сетку как раз достаточно, чтобы решить весы интерес (например, разрешение пограничный слой), то грубые сетки с половинным разрешением может оказаться недостаточным для задачи моделируемой.

Перед любая оценка ошибка дискретизации рассчитывается, он должен обеспечить, чтобы итераций достигается. (Итерационные методы всегда требуются для нелинейных задач, решаемых неявных формулировок и могут быть использованы как часть явной постановке, а также.) В противном случае неполной ошибка итерация будет загрязнять оценку неопределенности. (RE усиливает неполные ошибки итерации [4].) Широко используется, но оправдания правило, является требование, по крайней мере на три порядка уменьшением правильно нормированных остатков для каждого уравнения решаются по всей расчетной области. Этот критерий используется по умолчанию в некоторых коммерческих кодов, но явно недостаточно для многих задач даже для основной погрешностью, не считая добавленные требованиям оценки неопределенности. Результаты в работах [17, 18] опровергают небрежность этого правила. Для зависящих от времени моделирования, итераций на каждом шаге по времени должны быть проверены, и пример конвергенции тенденции должны быть задокументированы для выбранных, критически важных, переменных. Предпочтительный подход заключается в снижении итеративный ошибку уровень незначительными по сравнению с ошибки дискретизации. Это не обязательно требует итерации с (практически) нуля станка.

Ошибка итерации и его взаимодействие с ошибкой дискретизации был тщательно изучен в работе [18] для одного класса задач; нет оснований полагать, что другие проблемы более доброкачественными. Метод оценки погрешности итерации на основе экстраполяции на геометрических прогрессий была разработана и обоснована, и наносили на реалистичных турбулентных течений. Эти результаты показывают, что ошибка итерация должна быть от 2 до 3 порядков меньше, чем погрешность дискретизации, чтобы гарантировать незначительное влияние. Это часто предполагается, хотя редко убедительно показал. Если неопределенность и. предоставлены в (по оценкам) ошибки итерации гораздо меньше, чем э предоставлены в (упорядоченной) ошибки дискретизации, то возьмем численное неопределенность ипцт быть

$$u_{\text{num}} = u_h \quad (2-4-1)$$

Если больше внимание уделяется и ут должен быть добавлен, это не является адекватным (консервативный) использовать RMS дополнение, потому что ошибка итерации влияет на результаты на ошибку дискретизации (то есть, ут и э-э, не коррелируют), нарушая основную мысль Номинальная дополнение. Скорее, два должны быть объединены менее оптимистично простым добавлением [18].

$$u_{\text{num}} = u_h + u_i \quad (2-4-2)$$

Применение электр и GCI часто сталкиваются с некоторыми трудностями в практических задач. Местные значения прогнозируемых переменных не может проявлять гладкую, монотонную зависимость от разрешения сетки, и в зависимости от времени расчета, это негладкой ответ будет также зависеть от времени и в пространстве. Тем не менее, интегральные величины, как общего коэффициента теплопередачи, коэффициента подъемной силы, и т.д., как правило, лучше ведет себя (то есть, скорее всего, сходятся монотонно).GCI, особенно наименьших квадратов версии первым производителем Эга и Хоекстра [13; см. также 14, 19, 20 в Не-обязательные Приложение С], в настоящее время наиболее надежным и проверенным способом доступны для прогнозирования численного неопределенности.

Влияние оттока граничное положение на внутренней раствора будет зависеть от состояния оттока, используемой и от расстояния до выходной части границы. Ошибки этих приближений не исчезают, как $h \rightarrow 0$, и, следовательно, "неупорядоченные приближения" или ошибки моделирования, а не ошибки дискретизации. (См. также Необязательные Приложение С.) То же можно сказать и для других границ дальнего поля. Адекватность этих приближений следует оценивать по тестам чувствительности [4], по крайней мере на аналогичные проблемы, но, к сожалению на практике эти тесты не раз обращались убедительно.

2-4.1 Пятиступенчатая процедура оценки неопределенности

Пятиступенчатый процедура определена ниже для применения конвергенции индексной сетки (GCI) метод [3].

Шаг 1: Определите репрезентативной ячейку, сетка, или размер сетки, ч. Например, для трехмерных, структурированных, геометрически подобных сетей (не обязательно декартовы),

$$h = [(\Delta x_{\text{max}})(\Delta y_{\text{max}})(\Delta z_{\text{max}})]^{1/3} \quad (2-4-3)$$

Для неструктурированных сетках можно определить

$$h = \left[\left(\sum_{i=1}^N \Delta V_i \right) / N \right]^{1/3} \quad (2-4-4)$$

где

N = общее число клеток, используемых для вычислений

V_i = объем ячейки V_h [4]

Шаг 2: Выберите три значительно различные наборы резолуций сетки и запускать симуляции для определения значений ключевых переменных, важных для цели исследования моделирования (например, переменная $\langle p \rangle$). Есть некоторые преимущества в использовании целого сетки изысканность, но это не обязательно. Желательно, чтобы коэффициент уточнение сетки, $g = h_{\text{max}}/h_{\text{rme}}$, должно быть больше, чем 1,3 для боль-

шинства практических проблем. Это значение 1,3 снова на основе опыта, а не на какой-то формальный вывод. Сетка уточнение должно, однако, быть систематически; то есть, само по себе усовершенствование должны быть структурированы даже если сетка неструктурированным. Геометрически подобные клетки в последовательности сетки требуется, чтобы избежать шумной и ошибочное наблюдаемое с. Настоятельно рекомендуется не использовать различные факторы сгущением сетки в разных направлениях (например, $g = 1,3$ и $= 1,6$), поскольку ошибочные наблюдаемые значения p производятся, как показано в [21]. (Вычислительные решения еще сходятся к правильных ответов с $g \times JY$ но наблюдаемая скорость сходимости p влияет.)

Шаг 3:?? Пусть $/, </, <h3$ и $r21 = h_j h_x$, $r32 = h_3/h_2$ и рассчитать кажущуюся (или наблюдаемое) порядок, P , метода из [4]

$$p = \left[1/\ln(r_{21}) \right] \left[\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p) \right] \quad (2-4-5)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (2-4-6)$$

$$s = 1 \cdot \text{sign}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad (2-4-7)$$

где $\varepsilon_{32} = \langle p_3 - \langle p \rangle_{e2x} = TP2 - \langle p \rangle$ и $\langle p \rangle$ обозначает значение моделирования переменной на K, H сетке. Обратите внимание, что $d(p) = 0$ для $g = \text{постоянной}$. Это набор из трех уравнений может быть решена с помощью неподвижную точку итерации с начального приближения, равной первого срока (т.е. $Q = 0$).

Минимум четыре сеток требуется, чтобы продемонстрировать, что наблюдаемый порядок p постоянна для серии моделирования. Три сетки решение для наблюдаемый порядка p может быть адекватной, если некоторые из значений переменной $\langle p \rangle$ предсказал на трех сетках в асимптотической области серии моделирования. На самом деле, это может потребовать более четырех сеток убедительно продемонстрировать асимптотическое ответ в трудных проблем, возможно, пять или шесть сетки резолуций в тех случаях, когда сходимость шумно [13,19, 20]. Это все зависит от исходного разрешения сетки, используемой и где прогнозируемое значение ϕ находится в зависимости от разрешения сетки. Однако, чтобы обеспечить баланс между обеспечивая как послушный метод и обеспечение уровня точности в предсказанной наблюдаемый порядка p , по крайней мере, исследование трех сетка должна быть выполнена. Если решение об ошибке проверка и неопределенность терминов SSN и USN, соответственно, то установлено, что мало по сравнению с другими 5. И «. термины в этом стандарте, три ячейки могут затем быть достаточно. Если нет, то больше сетки потребуется.

Шаг 4: Рассчитать экстраполированные значения из уравнения

$$\varphi_{\text{ext}}^{21} = (r_{21}^p \varphi_1 - \varphi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (2-4-8)$$

Шаг 5: Рассчитать и сообщить следующие оценки погрешности наряду с наблюдаемой порядка метода p . Приблизительная относительная погрешность может быть приведен в качестве безразмерном виде [ур. (2-4-9)] или в размерном виде [ур. (2-4-10)]:

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right| \quad (2-4-9)$$

$$e_a^{21} = |\varphi_1 - \varphi_2| \quad (2-4-10)$$

Если $\langle p \rangle$, равна нулю или пользователь хочет, чтобы вычислить U_{num} (см. формулы. 2-4-13 и 2-4-14), то следует использовать ур. (2-4-10).

Расчетное экстраполировать относительная погрешность:

$$e_{\text{ext}}^{21} = \left| \frac{\varphi_{\text{ext}}^{21} - \varphi_1}{\varphi_{\text{ext}}^{21}} \right| \quad (2-4-11)$$

Штраф Индекс Сетка Конвергенция:

$$GCI_{\text{fine}}^{21} = \frac{Fs \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (2-4-12)$$

Оценки относительно ошибок и GCI может использовать нормализации на основе других, чем местные ценности ценностей; на самом деле, это часто выгодно для избежания детерминированности. Кроме того, оценки погрешности и GCI может использовать мерные значения вместо относительных или нормированных значений [4, с 113 115]. Это часто более естественным выбором для использования с экспериментальными результатами и будет использован в примерах в разделе 7.

Запас прочности, FS , первоначально присваивается значение 3 для исследований двух сетки [16], но Роуч [4] впоследствии рекомендовал менее консервативное значение для $\Phi = 1,25$, но только при использовании по крайней мере три сетки решения и наблюдаемое с. Он прибыл в этот стоимости через эмпирических исследований, и это значение примерно коррелирует с определением неопределенности U , используемого в ссылках [22, 23] и предполагает, что с использованием значения 1,25 приводит к GCI с 95% доверительного интервала. Дальнейший опыт в сотнях случаев CFD (более 500 продемонстрировали случаев) по десяткам групп поддержал эту эмпиризму [4, 13, 14, 15, 19, 20, 24]. На основе этой имеющихся данных, мы рекомендуем значение $\Phi = 1,25$ использоваться с тремя сетки исследований с участием структурированный сетки доработки. (Заметим, что база сетка может быть неструктурированные, но последовательность сетка может гене-

пироваться структурированной уточнения неструктурированной сетки [4]).

Значение $\Phi = 1,25$ не было тщательно оценено на неструктурированной сетке. Разброс в наблюдаемой p и следовало ожидать, потому что сетка уточнения фактором g корректно определено только для геометрически подобных сетей. Точность GCI очевидно, будет зависеть от качества неструктурированной сетки алгоритма очистки. До достаточного множества данные не собираются и исследования будут завершены в течение неструктурированной изысканности, как правило, рекомендуется, что более консервативны значение $\Phi = 3$ можно использовать для получения GCI для неструктурированной сгущением сетки. (Результаты, которые будут представлены в разделе 7 хорошего поведения, и $F_s = 1,25$ достаточно.)

Если расчетный порядок метода p меньше 1,0, интервал неопределенности также могут быть даны в предположении $p = 1,0$. Это делается не игнорировать наблюдаемое p , а просто дать два расчета, один с наблюдаемой p и один с $p = 1,0$, а показатель чувствительности к полосе ошибок наблюдаемого значения s . Тем не менее, GCI вычисляется с наблюдаемой $p < 1$ является более консервативный подход. Следует также отметить, что если наблюдаемое значение p значительно отличается от ожидаемого порядка методом (например, метод можно было бы ожидать, что третьего порядка для первичных переменных, но следует отметить, будет меньше, чем 1), то следует углубиться в первопричине этой разницы. Это может свидетельствовать о возможной ошибки в методе или его реализации, или, что резольюции сетки не в асимптотической области, или, что особенность присутствует. (См. ссылки [25, 26] для методы для обнаружения и отличить особенности во время сетки конвергенции исследований.)

Форма GCI основана на теории, но использование абсолютных значений для оцененных ошибок и фактор Φ основаны на эмпиризме участием рассмотрение нескольких сотен CFD тематических исследований. Эмпирические тесты включали определение консерватизма в 95% случаев, что соответствует (мерная) $GCI = U_{num}$ на 95% уверенностью. Не было сделано никаких предположений о виде распределений ошибок ни были необходимы для этих эмпирических исследований, так как фактические данные были рассмотрены с простым Pass / Fail критерия. В частности, общий статистический предположение о гауссовым распределением не был использован. Согласиться с нового международного стандартного использования одного стандартного отклонения σ , ур. (1-5-10) была разработана с использованием LCR, и соответствующая неопределенность W_{Num} . Если процедура принята для других компонентов неопределенности является основывать все на часто используемых расширенная LI95 уровень неопределенности %, то $U_{num} = GCI$ и не предположение о распределении требуется. В противном случае, чтобы превратить эту (частично) эмпирическую GCI от U_{num} к «пит необходимой в уравнении. (1-5-10), теперь надо сделать предположение. Если распределение было Gaussian о тонкой сетки раствором, значение и были бы получены с использованием коэффициента расширения $k = 2$, а требуемое термин для ур. (1-5-10) будет

$$u_{num} = U_{num}/k = GCI/2 \quad (2-4-13)$$

Однако распределение ошибка о тонкой решения сетки примерно гауссово только для плохо оптимизированных задачах (колебательная конвергенции). Для хорошего поведения и очень решены проблемы, распределение ошибка примерно гауссово не о тонкой решения сетки, а о экстраполированной решения IP2], уравнения. (2-4-8) [т. е. мелкая сетка решение IP плюс оценкам подписали ошибка $e2x't$ из ур. (2-4-11)]. Таким образом, распределение ошибки о тонкой решения сетки примерно сдвинутым гауссовым. Анализ этой ситуации указывают на коэффициент расширения $k = 1,1$ до 1,15, чтобы получить консервативное значение для U_{num}

$$u_{num} = U_{num}/k = GCI/1.15 \quad (2-4-14)$$

Если общий U_{mi} позже расширен до $U_{95\%}$, используя $k = 2$, численное вклад тогда будет более консервативным, чем 95% (см. раздел 6).

Процедура пятиступенчатый представлены в этом разделе не делает различий между стационарных вычислений или зависящих от времени вычислений. Способ не зависит от временного разрешения в том смысле, что M не появляется в любом из уравнений. Таким образом, для зависящих от времени вычислений, пятиступенчатый процедура должна быть применена на каждой соответствующей временной шаг в расчете на данном узле. Тем не менее, следует отметить, что в качестве пространственной сетки очищается во время исследования сходимости, размер M , вероятно, также уменьшается из-за проблем со стабильностью численных и, таким образом При неявно учитываются при исследовании сходимости. Хотя здесь не обсуждается, было показано, что описанная выше процедура может быть применена составляет как пространственной, так и временной сетки конвергенции в явном виде. M лечится так же, как Ax лечится. Тем не менее, некоторые незначительные осложнения возникают в типичном случае, когда численные методы имеют разные порядки точности в пространстве и времени, или даже разных порядков в разных пространственных направлениях, что может иметь место в пограничных кодах слоя [4].

Пункты 2-4.2 Срок и 2-4.3 данном примере проверки решение для двух реалистичных и сложных проблем в ЦФО. Настоящий стандарт также приведены примеры для задач теплопроводности, которые менее требовательны численно и проявляют близко к теоретической производительности. Но следующие две проблемы СГО не так идеально, и сходимость поведения являются представителем многих реальных и практических проблем, что читатель, скорее всего, нужно иметь дело.

2-4.2 Пример 1: Меняющийся поток над обратной стадией

Чтобы продемонстрировать результаты расчета GCI следующие этой пятиступенчатой процедуры, данные в таблице 2-4-1 используются от Челик и Каратекин [12], где устойчивый, турбулентный поток над отсталой, обращенной шаг был смоделирован на неравномерных сетках с общее число клеток, заданными по трем резо-

люциям сетки, N_x , N_2 и N_y две переменные были использованы в оценке uncertainties: безразмерный длину прикрепления, L , и осевая скорость, V , в определенном месте. В данном исследовании, два различных набора сетки уточнений были использованы для двух переменных, представляющих интерес. Для безразмерной прикреплении Длина, L , три резолуции сетки были использованы 4500, 8000, и 18000 клеток; а для осевой скорости, V , были использованы три сетки резолуции 980, 4500 и 8000 клеток. Так как порядок метода с точки зрения осевой скорости составляет менее 1 В этом примере четыре столбца отображает результаты, где значение p предполагается равным 1. На основе этого анализа с $F_s = 1,25$, значение длины прикрепления бы сообщены как $6,06 \pm 0,09$ ($\pm 1,46\%$) и скорости осевой V в точке, как $10,8 \pm 0,12$ ($\pm 1,06\%$).

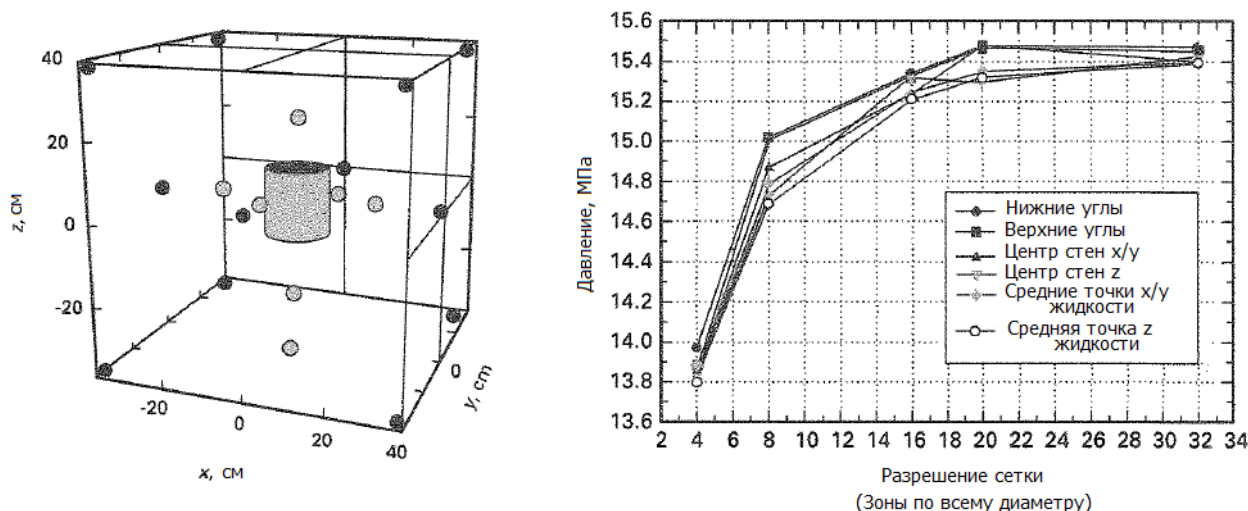
Расчетные значения наблюдаемой p будучи нецелое и менее, чем теоретическое значение ($p = 2$ в данном случае) не являются ничего необычного в сложных приложений, даже для полностью проверенных кодов (часто не относится к коммерческим программным обеспечением). Реальные проблемы с участием местных высокие градиенты в растворе, и особенно ударных волн или других особенностей, уменьшить наблюдаемую p (или даже фактическое асимптотической p [4]), так как локально большие значения производных решений высшего порядка вызвать члены более высокого порядка в быть значительным в расширении в степенной ряд погрешностей дискретизации [4]. Этот пример (и второй, после) иллюстрирует важность оценки GCI, используя значения p наблюдаемые для фактического случае изучаемого, а не теоретическими значениями или исследований код верификации на основе хорошо себя проблемы.

Таблица 2-4-1 Пример анализа неопределенности: Шаг в обратном направлении

	L	V	$V (p = 1)$
N_1	18,000	8,000	8,000
N_2	8,000	4,500	4,500
N_3	4,500	980	980
r_{21}	1.5	2.0	2.0
r_{32}	1.33	2.14	2.14
Φ_1	6.06	10.8	10.8
Φ_2	5.97	10.7	10.7
Φ_3	5.86	10.6	10.6
p	1.53	0.75	1.00
ϕ_{ext}^{21}	6.17	10.9	10.9
e_a^{21}	1.50%	0.58%	0.58%
e_{ext}^{21}	1.71%	0.85%	0.58%
GCI_{line}^{21}	1.46%	1.06%	0.73%

Во многих практических случаях рассчитывается на период более одного сетки триплет будет шумно наблюдаемое p , раскрывая неустойчивой или даже немонотонную сходимость; в таких случаях, наименьших квадратов подход, разработанный в работах [13, 14, 19, 20] рекомендуется (Необязательные Приложение С). Альтернативные методы с выбором GCI или других методов колебательных или немонотонном сходимости обсуждаются в ссылках [25, 26]. Однако следует отметить, что наблюдается p значения, которые приблизительно равны теоретическая p можно получить с хорошими алгоритмов, хорошей сеток, высокое разрешение и тщательной работы, даже для зависящих от времени турбулентных течений [4], или проблем с ударными фронтами. Для задач теплопроводности, он является общим для наблюдаемый p быть хорошо себя вели, как показано в разделе 7.

Рис. 2-4-1 Пример анализа неопределенности: Взрывчатая детонация в заполненной жидкостью коробке



2-4.3 Пример 2: Детонация с оболочкой

Рисунок 2-4-1 обеспечивает другой пример пятиступенчатой процедуры расчета GCI за плату TNT взорвалась в жесткой, заполненной жидкостью окне. Количество интерес представляет квази-статическое давление в разных местах в коробке (заштрихованные точки в левом изображении) после конечного прошедшего времени в зависимости от времени моделирования. Право на изображение на этом рисунке показывает прогнозируемое значение давления в зависимости от разрешения сетки при различных измерительных местах предсказанных множества симуляций. В этом примере величина давления имеет гладкую зависимость от разрешения сетки. Основой для разрешения сетки используемого число зон по диаметру заряда.

Таблица 2-4-2 обобщены результаты применения ИГК к взрывному проблемы детонации. Здесь давления на трех разных местах используются [т.е. узел в углу коробки (встречному), узел недалеко от центра стороне коробки (стены), и узлом на середине расстояния между зарядом средней и коробкой сторона (жидкость)]. Вторая строка таблицы предоставляет вычисленного (наблюдаемое) порядок метода, а третий ряд обеспечивает вычисленное GCI помощью $F_s = 1,25$. Чтобы вычислить эти значения, первые четыре резолюции сетки (4,8,16 и 20 зон по диаметру заряда) были использованы. Строки четыре и пять обеспечить диапазон давления как и предсказывает GCI, но представлены с оценками неопределенности U и и. Диапазон значений J_{num} $p_{um} \pm L_{um}$ предназначен для связана точное математическое решение с уверенностью на 95% в, или оценки 2а неопределенности, в то время как значение $\pm M_{num}$ (пятая строка таблицы 2-4-2) является оценка кр неопределенность. Шестой строка в таблице показывает прогнозируемое значение давления на мелкой сетке (резолюция из 32 зон по всему диаметру заряда). Отображаемые в строке четыре стола диапазоны должны затем связывается значения здесь, и они, опять же, демонстрируя и обоснованность такого подхода и целесообразность величины $\Phi = 1,25$ в методе GCI.

Таблица 2-4-2 Пример анализа неопределенности: Взрывчатая детонация

Расположение переменной	Угол	Стена	Жидкость
Контролируемый порядок p	1.7	1.5	1.02
Значение GCI (%)	1.2	1.6	3.6
Значение $\pm U_{num}$	15.34 \pm 0.18 МПа	15.23 \pm 0.24 МПа	15.24 \pm 0.55 МПа
Значение $\pm U_{num}$	15.34 \pm 0.16 МПа	15.23 \pm 0.21 МПа	15.24 \pm 0.48 МПа
Прогноз частой сети	15.47 МПа	15.40 МПа	15.39 МПа

2-5 Отдельные вопросы

Переменная моделирование, $\langle p \rangle$, что оценивается по пятиступенчатой процедуры абз. 2-4.1 может быть любой результат моделирования: локальные значения зависимых переменных, таких как U, V, p; Объем-взвешенный значения RMS; или интегрированы функционалов от решения, как коэффициента подъемной силы или теплового потока. Те же самые принципы проверки решения применяются во всех случаях, но следует отметить следующее. Во-первых, интегрированные функционалы обычно лучше себя ведет (более гладкой), чем местных ценностей и, таким образом, наблюдается p имеет тенденцию быть менее шумным. Во-вторых, различные переменные моделирования могут сходиться с разной скоростью. В-третьих, те же методы для проверки решения могут быть применены к производным интегрированных функционалов по отношению к входным параметрам, как должны будут в следующем разделе.

Необходимо соблюдать осторожность при определении соответствующих требованиям разрешения сетки как для сетки конвергенции упражнений и разрешения сетки, необходимой для минимально решить физику проблемы. Например, если проблема должна быть решена имеет определенный диапазон пространственных масштабах, которые характеризуют физику потока, такие как граничных слоев или тепловых градиентов, то разрешение сетки для самой грубой сетке, используемой в конвергенции исследования сетки должны еще адекватно решить эти пространственными масштабами. Это особенно важно в контексте крупных вихрей (LES). Ширина LES фильтр обычно связана с мерой разрешения сетки, и, таким образом, как разрешение сетки изменяется во время исследования сходимости сетки, ширина фильтра также изменяется. Это означает, что разделение энергии между разрешенных и неразрешенных масштабах меняется. Таким образом, если пользователи не будете осторожны и, как сходимость исследование сетка выполнена, они могут быть решения другая проблема для некоторых из резолюций крупной сеткой, если граница между разрешенных и неразрешенных веса существенно меняется от сетки к сетке. Та же логика применима к прямого численного моделирования (DNS), а также, в том, что более крупные резолюций сетки не может решить тот же набор соответствующего потока веса адекватно квалифицировать моделирование как DNS. Моделирование DNS по определению решает все соответствующие масштабы потока (в частотной области) до вязкой диссипации.

Наконец, в следующем предлагается в качестве подхода для эффективного и результативного выполнения и использовать проверочный решение упражнения в приложениях. Для данной задачи для моделирования, первый шаг заключается в определении ряда целей моделирования (т.е. почему проблема в настоящее время моделируется, в каких количествах представляют интерес для прогнозирования, и то, что уровень точности не требуется). С учетом целей моделирования, номинальная проблема моделирования определяется, в том числе граничных и начальных условий. Это номинальная проблема должна быть представитель поставленной задачи должны быть изучены (где обычно много моделирования выполняются для достижения решения задачи). Это номинальная проблема тогда будет служить основой для решения проверки сетки конвергенции исследования. Подробный сетки конвергенции изучение этой конкретной, номинальной проблемы выполняется с 3 до 6 уровней сгущением сетки (по аналогии с ограниченной например детонации проблеме пункт. 2-4.3). По результатам проверки решений для номинального проблемы, определяется разрешением сетки база, которая достигает целей моделирования для расчетной точности. Эта резолюция сетка базового затем использу-

ется во всех последующих расчетов для конкретной задачи. Если в ходе последующих моделирования, определение проблема значительно изменяется таким образом, что номинальный проблема больше не является представителем исследования, то новый номинальный проблема должна быть определена, и новый раствор проверка выполняется.

2-6 Итоговый комментарий

В заключении код проверки деятельности следующей процедуры, определенные в этом разделе, аналитик определили потенциальные ошибки кода. Предполагается, то, что эти ошибки привели к модификации и усовершенствования в компьютерном коде, чтобы устранить или исправить их. После того, как проверено код достигается для применения интереса, то проверка раствор усилие в соответствии с процедурами, определенными в данном разделе будет приводить к получению оценки неопределенности (и) связан с в результате моделирования. Во многих приложениях в области техники и научной практике, эти две процедуры, код проверки и проверки решение, может быть все, что требуется для применения интерес как это диктуется требованиями проекта или может быть все, что возможно из-за отсутствия надлежащего экспериментальных данных для проверки. Если это так, то успешного завершения проверки решение усилия (что предполагает, что предшествовало код верификации усилий) для применения интерес приведет к значительным шагом вперед в понимании достоверность данной моделирования исследования в том, что в настоящее время это может быть сообщено, что решение является значение X с числовым неопределенности Y. Однако, на данный момент в этом стандарте, пользователь может лишь констатировать оценочную величину U_{num}. Никто не может на данном этапе оценить общую точность модели. Это может быть сделано только через проверки, которая требует материал, представленный в разделах 3 по 7 настоящего стандарта.

2-7 Список литературы

- [1] Roache, P. J., Ghia, K. and White, F. (1986), "Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 108, No. 1, March 1986, pg. 2.
- [2] Freitas, C. J. (1993), "Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy," Journal of Fluids Engineering, Vol. 115, September, pp. 339-340, 1993.
- [3] Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. W., and Raad, P. E. (2008), "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty due to Discretization in CFD Applications," ASME Journal of Fluids Engineering, Editorial, Vol. 130, No. 7, July 2008, pp. 078001-1 - 078001-4, 4 pages.
- [4] Roache, P. J. (1998), Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Publishers, Albuquerque.
- [5] Oberkampf, W. L. and Trucano, T. G., "Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 38, No. 3, 2002, pp. 209-272.
- [6] Roache, P. J. (2004), "Building PDE Codes to be Verifiable and Validatable," Computing in Science and Engineering, Special Issue on Verification and Validation, September/October 2004, pp. 30-38.
- [7] Roache, P. J. (2002), "Code Verification by the Method of Manufactured Solutions," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 114, No. 1, March 2002, pp. 4-10.
- [8] Knupp, P. and Salari, K. (2002), Verification of Computer Codes in Computational Science and Engineering, CRC Press, Boca Raton.
- [9] Celik, I., Chen, C. J., Roache, P. J., and Scheuerer, G, eds. (1993), Proceedings: Symposium on Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics, ASME Fluids Engineering Division Summer Conference, June 20- 24, Washington, D.C., Vol. 158.
- [10] Richardson, L. F. (1910) "The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses In a Masonry Dam," Transactions of the Royal Society of London, Ser. A, Vol. 210, pp. 307-357.
- [1] Роуч, PJ, Ghia, К. и Белый, Ф. (1986), "Редакция себе о контроле за численной точности Политика", Журнал ASME жидкостей инженерии, Vol. 108, № 1, март 1986, стр.. 2.
- [2] Фрейтас, CJ (1993), "Редакционная политика Заявление о контроле за численной точности," Журнал жидкостей инженерии, Vol. 115, сентябрь, стр. 339-340, 1993.
- [3] Челик, IB, Ghia, У., Роуч, PJ, Фрейтас, CJ, Коулман, HW, и Раад, ЧП (2008), «Порядок оценки и представления докладов неопределенности из-за дискретизации в CFD приложений», Журнал ASME жидкостей инженерии, редакция, Vol. 130, № 7, июль 2008 г., стр. 078001-1 - 078001-4, 4 страницы.
- [4] Роуч, PJ (1998), верификации и валидации в области вычислительной науки и техники, Hermosa издателей, Альбукерке.
- [5] Оберкамф, WL и Trucano, ГТГ, "Верификация и валидация в вычислительной гидродинамики," Прогресс в области аэрокосмической наук, Vol. 38, № 3, 2002, стр. 209-272.
- [6] Роуч, PJ (2004), "Строительство PDE Коды быть проверяемый и подтверждаемых," вычисления в области науки и техники, Специальный выпуск верификации и валидации, сентябрь / октябрь 2004 года, стр. 30-38.
- [7] Роуч, PJ (2002), "Код верификации методом производимых Solutions," Журнал ASME жидкостей инженерии, Vol. 114, № 1, март 2002, стр. 4-10.
- [8] Knupp, П. и Salari, К. (2002), контролю компьютерных кодов в вычислительной науки и техники, CRC Press, Бока-Ратон.
- [9] Челик, И., Чэнь, CJ, Роуч, PJ, и Scheuerer, G, ред. (1993), Труды: симпозиум по количественной неопределенности вычислительной гидродинамики, ASME Жидкости Технический отдел Летняя конференция 20 июня - 24, Вашингтон, округ Колумбия, Vol. 158.
- [10] Ричардсон, Л. Ф. (1910) "Приблизительное Арифметическая Решение конечных разностей от физических проблем, связанных с участием дифференциальных уравнений, с приложением к Напряжения в каменной плотины," Труды Королевского обще-

- [11] Richardson, L. F. and Gaunt, J. A. (1927), "The Deferred Approach to the Limit," *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 226, pp. 299-361.
- [12] Celik, I., and Karatekin, O. (1997), "Numerical Experiments on Application of Richardson Extrapolation With Nonuniform Grids," *J. Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 584-590.
- [13] Ega, L. and Hoekstra, M. (2002), "An Evaluation of Verification Procedures for CFD Applications," 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 8-13 July 2002.
- [14] Pelletier, D. and Roache, P. J. (2006), "Verification and Validation of Computational Heat Transfer," Chapter 13 of *Handbook of Numerical Heat Transfer*, Second Edition, W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, and J. Y. Murthy, eds., Wiley, New York.
- [15] Roache, P. J. (2003), "Error Bars for CFD," AIAA Paper 2003-0408, AIAA 41st Aerospace Sciences Meeting, January 2003, Reno, Nevada.
- [16] Roache, P. J. (1993), "A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies," *Proceedings of Quantification of Uncertainty in Computation Fluid Dynamics*, Edited by Celik, et al., ASME Fluids Engineering Division Spring Meeting, Washington D.C., June 23-24, ASME Publ. No. FED-Vol. 158.
- [17] Ega, L. and M. Hoekstra, M. (2006), "On the Influence of the Iterative Error in the Numerical Uncertainty of Ship Viscous Flow Calculations," *Proc. 26th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Rome, Italy, 17-22 Sept. 2006.
- [18] Ega, L. and M. Hoekstra, M. (2007), "Evaluation of Numerical Error Estimation Based on Grid Refinement Studies with the Method of Manufactured Solutions," Report D72-42, Instituto Superior Tecnico, Lisbon.
- [19] Ega, L., Hoekstra, M., and Roache, R. J. (2005), "Verification of Calculations: an Overview of the Lisbon Workshop," AIAA Paper No. 4728, AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Toronto, June 2005.
- [20] Ega, L., Hoekstra, M., and Roache, P. J. (2007), "Verification of Calculations: an Overview of the Second Lisbon Workshop," AIAA Paper 2007-4089, AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, June 2007.
- [21] Salas, M. D. (2006), "Some Observations on Grid Convergence," *Computers and Fluids*, Vol. 75, No. 7, Aug. 2006, pp. 688-692.
- [22] Coleman, H. W. and Stem, F. (1997), "Uncertainties and CFD Code Validation," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, December 1997, pp. 795-803.
- [23] Stem, E., Wilson, R. V., Coleman, H. W., and Paterson, E. G. (2001), "Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations — Part 1: Methodology and Procedures," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, pp. 793-802, December.
- [24] Roache, P. J. (2003), "Conservatism of the GCI in Finite Volume Computations on Steady State Fluid Flow and Heat Transfer," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, No. 4, July 2003, pp. 731-732.
- [25] Sinclair, G. B., Anaya-Dufresne, M., Meda, G., and Okajima, M. (1997), "Tuned Test Problems for Numerical Methods in Engineering," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 4183-4209.
- [26] Sinclair, G. B., Beisheim, J. R., and Sezer, S. (2006), "Practical Convergence-Divergence Checks for Stresses from FEA," *Proc. 2006 International ANSYS Users Conference* in Лондоне, сер., Vol. 210, стр. 307-357.
- [11] Ричардсон, Л. Ф. и Гонт, Ж. А. (1927), "Отложенный подход до предела," *Philos. Сделка Р. Соц. Лондон, Ser.*, Vol. 226, стр. 299-361.
- [12] Челик И., Karatekin, O. (1997), "Численные эксперименты по применению Ричардсона экстраполяции на неравномерных сетках," *Ж. жидкостей инженерии*, Vol. 119, стр. 584-590.
- [13] EGA, Л. и Hoekstra, M. (2002), "Оценка проверке порядке CFD приложений," 24-й симпозиум по военно-морской гидродинамике, Фукуока, Япония, 8-13 июля 2002 года.
- [14] Пеллетье, Д. и Роуч, Р. Дж. (2006), "Проверка и подтверждение Вычислительная теплообмена," Глава 13 *Справочник по Численное теплообмена*, второе издание, WJ Minkowycz, E. M. Воробей, и Ю Мурти, ред., М.: Мир.
- [15] Роуч, Р. Дж. (2003), "Ошибка Бары для CFD," AIAA Бумага 2003-0408, AIAA 41-й Aerospace Sciences Meeting, январь 2003 г., Рино, штат Невада.
- [16] Роуч, Р. Дж. (1993), "Метод Единый отчетности сгущением сетки исследований," *Труды количественной оценке неопределенностей в расчетах динамики жидкостей*, под редакцией Челик, и др., ASME Жидкости Технический отдел Spring Meeting, Вашингтон, 23-24 июня, ASME Изд. Кол-ФЭД-Vol. 158.
- [17] EGA, Л. и M. Hoekstra, M. (2006), "О влиянии итерационного погрешности численного неопределенности расчетов Корабль вязкого течения," *Прос. 26-й симпозиум по военно-морской гидродинамике*, Рим, Италия, 17-22 сентября 2006.
- [18] EGA, Л. и M. Hoekstra, M. (2007), "Оценка численной оценки ошибок на основе сгущением сетки исследований с методом производимых Solutions," *Отчет D72-42*, Высшего технического института Лиссабона.
- [19] EGA, Л., Hoekstra M., Роуч, Р. Дж. (2005), "Проверка расчетов: Обзор Лиссабонского семинара," AIAA документ № 4728, AIAA Вычислительная гидродинамика Конференция, Торонто, июня 2005 года.
- [20] EGA, Л., Hoekstra M., Роуч, Р. Дж. (2007), "Проверка расчетов: Обзор Второй Лиссабонского семинара" AIAA Бумага 2007-4089, AIAA Вычислительная гидродинамика конференции, Майами, июнь 2007 года.
- [21] Салас, доктор медицинских наук (2006), "Некоторые замечания по грид-конвергенции," *Компьютеры и масла*, Vol. 75, № 7, август 2006, с 688-692.
- [22] Коулман, HW и Шток, Ф. (1997), "Неопределенности и CFD код проверки," *Журнал ASME жидкостей инженерии*, Vol. 119, декабрь 1997 г., стр. 795-803.
- [23] Шток, Е, Уилсон, Р. В., Коулман, HW, и Патерсон, Е. (2001), "Комплексный подход к верификации и валидации CFD Симуляторы - Часть 1: Методология и процедуры," *Журнал ASME жидкостей инженерии*, Vol. 123, стр. 793-802, декабрь.
- [24] Роуч, Р. Дж. (2003), "Консерватизм ИГС в конечный объем вычислений на стационарного состояния гидродинамики и теплообмена," *Журнал ASME жидкостей инженерии*, Vol. 125, № 4, июль 2003, с 731-732.
- [25] Синклер, ГБ, Анайя-Dufresne, М., Меда, G, и Окајима, М. (1997), "Tuned тестовых задач для численных методов в инженерии," *Международный журнал по численным методам в области инженерии*, Vol. 40, pp 4183-4209.
- [26] Синклер, ГБ, Beisheim, JR, и Сезер, С. (2006), «Практические Конвергенция-дивергенция Проверяет напряжений от ВЭД," *Прос. 2006 Международный*

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3-1 Введение

Это раздел посвящен оценке неопределенности моделирования из-за неопределенности входных параметров моделирования, обозначенных M_{input} в уравнении. (1-5-10), раздел 1.

Неопределенность проверка была ранее определена в разделе 1, как состоящую из неопределенности в численном моделировании U_{num} , входные параметры u_{input} и данных UD и дается

$$u_{val}^2 = u_{num}^2 + u_{input}^2 + u_D^2 \quad (3-1-1)$$

Раздел 2 представлены методы для оценки «NUM и разделе 4 методы обсуждаются оценки UD . В центре внимания разделе 3 является оценка u_{input} , неопределенность моделирования в связи с неопределенностью в входных параметрах моделирования.

Вычислительные моделирования обычно содержат экспериментально определяемых параметров, которые имеют неопределенности, связанной с ними. Модель системы может варьироваться от алгебраического уравнения к системе уравнений в частных производных. Для примера теплопередачи, это может быть желательно оценить неопределенность в прогнозах температуры модели, учитывая неопределенность в теплопроводности (y), объемная теплоемкость (y), и коэффициент конвективной (y) теплопередачи. Для примера потока жидкости, это может быть желательно оценить неопределенность в коэффициента сопротивления, учитывая неопределенность в свойств жидкости.

Два разных подхода для оценки u_{input} будут представлены. Эти два подхода зависит от имеет ли один локальный или глобальный взгляд на процесс оценки неопределенности. Локальный вид будет озабочены отклик системы в небольшом (локальной) окрестности номинального вектора параметров. В литературе, как локальный вид известен под разными именами: метод коэффициент чувствительности, метод возмущений, среднее метод значение, метод первого порядка, и, возможно, другие. Глобальный взгляд озабочены отклика системы в большой (глобальной) окрестности номинального вектора параметров. В литературе, глобальный взгляд известен под разными именами: метод отбора проб, метод Монте-Карло, и, возможно, другие. В следующих разделах, описание локальных и глобальных процедур оценки неопределенности будут представлены наряду с примера каждого из них.

3-2 Метод коэффициента чувствительности (локальный) для распространения неопределенности параметров

Использование линейного разложение в ряд Тейлора в пространстве параметров, вход неопределенность Уравнение распространения для результате моделирования S с p некоррелированных случайных входных параметров

$$u_{input}^2 = \sum_{i=1}^p \left(\frac{\partial S}{\partial X_i} u_{X_i} \right)^2 \quad (3-2-1)$$

где

S = результат моделирования

u_{X_i} = соответствующая стандартная неопределенность во входном параметре X_i .

X_i = входной параметр

Для ситуаций, в которых параметры полученных из базы данных, предположение о некоррелированных ошибок является хорошим.

Результат моделирования S в уравнении. (3-2-1) может быть значение точки переменной моделирования или неотъемлемой количество таких как общего сопротивления или теплопередачи. Частные производные, $\partial S / \partial X_i$, называются коэффициенты чувствительности результирующего S относительно входного параметра, X_i . Термин в скобки в формуле. (3-2-1) часто пишется как X_i М-~, где X_i является номинальной стоимости параметра. Такой подход делает его удобным для задания относительного стандартная неопределенность %. / X_i . вместо абсолютного стандартной неопределенности u_{X_i} . Остальные коэффициент чувствительности X_i называется уменьшенную коэффициента чувствительности и имеет единицы S . уравнении (3-2-1) указывает следующие два компонента необходимы для уравнения распространения неопределенности:

(а) коэффициент чувствительности

(б) неопределенность входной параметр

В материале, который следует, обсуждение того, как получить эти две величины в уравнении. (3-2-1), будут представлены.

3.2.1 Оценка входной параметр неопределенности

В идеале, стандартные входные значения неопределенности, U_{X_i} , Приходят из предыдущих экспериментов. Например, предположим, один имеет переходный тепловую модель с несколькими материальной системы

с конвективных граничных условий. Эксперименты лабораторного масштаба были бы выполнены, чтобы определить теплопроводность и объемную теплоемкость каждого из материалов. Если измерения выполняются собственности, методы Раздела 4, должны быть использованы для оценки экспериментальную неопределенность. Более вероятный сценарий, что один будет использовать "базы данных (справочник) значения свойств" и, возможно, придется прибегнуть к мнению экспертов для неопределенности стоимости недвижимости коэффициента теплоотдачи. Опять же, предполагается, что экспериментатор сообщалось экспериментальной неопределенности; если нет, то мнение экспертов должны быть использованы для неопределенности.

3-2.2 Местные методов для расчета коэффициентов чувствительности

Многие методы, доступные для вычисления локальных коэффициентов чувствительности ($\Delta S / \Delta X$) включают следующие:

- (а) конечных разностей (FD), в пространстве параметров
- (б) аналитическая дифференциация аналитических решений
- (в) сложный шаг (CS)
- (г) программное обеспечение дифференциации (например ADIFOR / ADIC)
- (д) способ уравнение чувствительности (SEM)
- (е) метод, сопряженный

Из перечисленных методов чувствительности, все обычно требуют доступа к исходному коду, за исключением FD. Доступ к требованию исходного кода всего включает в себя использование с коммерческим программным обеспечением. Следовательно, наше внимание будет сосредоточено на конечных разностей (в пространстве параметров) метода, который позволит код, который будет использоваться в «черного ящика» подходе. Остальные методы чувствительности являются темами текущих исследований и отсылаем читателя к [1-3].

3-2.3 Вычисление чувствительности коэффициентов при конечных разностей

Мера чувствительности результат моделирования S (g, t, X) на изменения параметра X . называется коэффициент чувствительности и определяется как

$$\text{Коэффициент чувствительности} = \frac{\partial S(z, t, X)}{\partial X_i} \quad (3-2-2)$$

где

t = время

X_j = один элемент X (вектор всех параметров задачи)

g - радиус-вектор

В этом разделе, это подразумевается, что коэффициент чувствительности оценивается по номинальной стоимости вектора параметров. В результате моделирования S может быть температура, скорость, тепловой поток, напряжение сдвига, перетащить, теплопередача и др. Для одного проблеме материала теплопередачи с участием теплопроводность, объемный теплоемкость, вязкость, и эмиттанс, номинальный вектор параметров будет $X = (k, \rho, c, \mu, \epsilon)$. Многие материалы будут присутствовать для промышленного теплопроводности или проблемы сопряжены теплопередачи. В этом случае тепловые свойства всех материалов, присутствующих будет частью вектора параметров, следовательно, вектор параметров может содержать. десятков до сотен элементов.

В простом случае алгебраической модели, коэффициенты чувствительности $\Delta S / \Delta X$. может быть вычислена аналитически. Однако более вероятным сценарием является то, что модель представляет собой комплекс численное моделирование, для которых конечная разности дифференциация является наиболее практичным подходом. Термин "конечных разностей", используемый здесь, относится к пространству параметров и не конечной разности в пространства / времени алгоритма дискретизации для численного решения дифференциальных уравнений в частных. Процедура Для запуска симуляции с номинальными значениями вектора параметров X . второй заход сделано с возмущенной значения ($X + \Delta X$). Для входного параметра X . конечных разностей в пространстве параметров затем используется для вычисления коэффициент чувствительности от

$$\frac{\partial S}{\partial X_i} = \frac{S(X_1, X_2, \dots, X_i + \Delta X, \dots, X_n) - S(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)}{\Delta X_i} + O(\Delta X_i) \quad (3-2-3)$$

Описанный выше процесс повторяется для каждого входного параметра. Если имеется p параметры, то $p + 1$ проходится кода моделирования будут обязаны вычислить p коэффициентов чувствительности первого порядка. Второй порядок точности конечных разностей является

$$\frac{\partial S}{\partial X_i} = \frac{S(X_1, X_2, \dots, X_i + \Delta X_i, \dots, X_n) - S(X_1, X_2, \dots, X_i - \Delta X_i, \dots, X_n)}{2\Delta X_i} + O(\Delta X_i^2) \quad (3-2-4)$$

Если используется центральная разность второго порядка, то число моделирования идет на $2n + 1$. Вычислительная нагрузка на конечной разности в методе пространстве параметров растет линейно с числом входных параметров, по которым неопределенность рассматривается. Основная трудность, связанная с методом конечных разностей является выбор соответствующего размера возмущений ΔX . Если ΔX слишком велик, ошибка усечения в уравнениях. (3-2-3) или (3-2-4) будет слишком большим. Если ΔX , слишком мал, машина округлить становится значительным, потому что вычитающей отмены в числителе формул. (3-2-3) или (3-2-4). Конечные коэффициенты разности чувствительности может быть проблематичным для неполной нелинейной итерации; см. ссылку [4] для обсуждения этого вопроса. Некоторые численное экспериментирование рекомендуется. Примером проблема поможет укрепить некоторые из вопросов, связанных с конечной разности (в пространстве параметров) метода.

3-2.4 Пример Часовой Неуверенно Распространение

Рассмотрим плоскую 1-D плиту подвергаются к постоянным тепловым потоком (q) на одной стороне, адиабату на другом лице, и равномерное начальную температуру (T). Аналитическое решение для температурного поля $T(z, t)$ дается в работе [5], как

$$\phi = \frac{T - T_i}{qL/k} = \frac{\alpha t}{L^2} + \frac{1}{3} - \frac{z}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{L} \right)^2 - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{\alpha t}{L^2} \right) \cos \left(n\pi \frac{z}{L} \right) \quad (3-2-5)$$

где

k = теплопроводность

L = толщина плиты

q = тепловой поток

z = расстояние от нагретой поверхности

$(= k / \rho c_p)$ = температуропроводность

Чувствительность температурного поля в теплопроводность может быть вычислена аналитически дифференциации ур. (3-2-5) по k , в результате чего

$$k \frac{\partial T}{\partial k} = \frac{qL}{k} \left(\alpha \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} - \phi \right) \quad (3-2-6)$$

где

$$\alpha \frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = \frac{\alpha t}{L^2} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{\alpha t}{L^2} \right) \cos n\pi \frac{z}{L} \right] \quad (3-2-7)$$

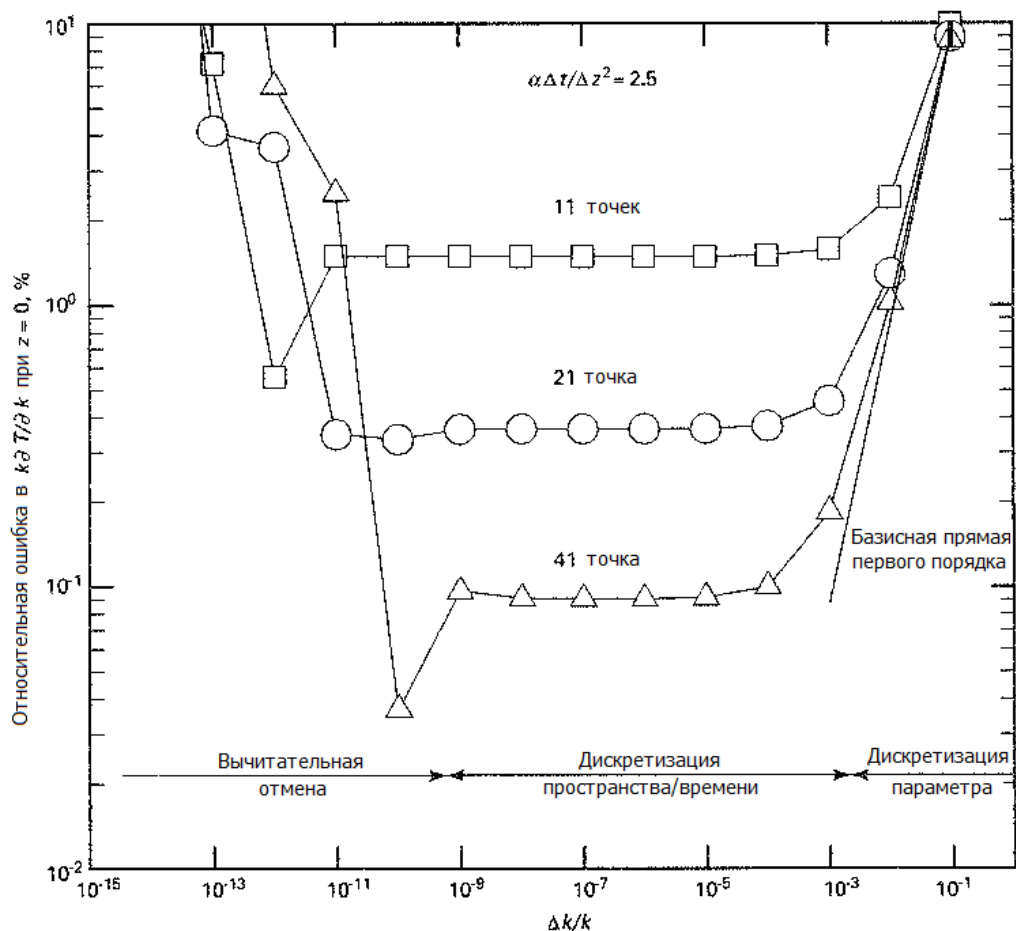
Отметим, что формула. (3-2-6) является масштабируется коэффициент чувствительности для теплопроводности k и имеет единицы температуры.

В то время как аналитические методы могут быть использованы для этой проблемы, например, численные методы, вероятно, должны быть использованы для большинства практических проблем. Значительное использование для аналитической дифференциации заключается в предоставлении проблемы с проверкой для других методов для вычисления коэффициентов чувствительности. Даже если коэффициенты Аналитическая чувствительность доступны, конечно-разностные методы часто используются для проверки правильности осуществления аналитических выражений.

Этот пример Задача решалась численно с использованием второго порядка в пространстве методом конечных разностей и первого порядка полностью неявная времени интегратора. Затем коэффициент чувствительности была рассчитана с использованием первого порядка конечных разностей в пространстве параметров определяется формулой. (3-2-3). Параметры пример проблемные, которые представитель нержавеющей стали, являются следующие:

$$\begin{aligned} q &= 4 \times 10^5 \text{ W m}^{-2}, \quad k = 10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad L = 0.01 \text{ m} \\ \rho &= 8000 \text{ kg m}^{-3}, \quad c_p = 500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad T_i = 300 \text{ K} \\ t_f &= 20 \text{ s}, \quad \alpha t_f / L^2 = 0.5, \quad \alpha \Delta t / \Delta z^2 = 2.5 \end{aligned} \quad (3-2-8)$$

Рис. 3-2-1 Относительная погрешность в конечных разностей вычисление KDT / Dk используя обратную разницу



ОБЩЕЕ ПРИМЕЧАНИЕ: Численный алгоритм дискретизации был второго порядка пространственной конечных разностей с первого порядка неявной интегратора времени и пространства / времени сетка уточнение поддерживал $\Delta t / \Delta z^2 = 2,5$.

Относительная погрешность в этом численное решение для масштабируемого коэффициента чувствительности KDT / H3 была вычислена с аналитическим решением от экв, (3-2-6), принятого за точный ответ. Расчетная область была пространственно дискретизации в равномерно расположенных узлов. Рисунок 3-2-1 представлены результаты расчетов для ошибки коэффициента термического чувствительности проводимости для сетей 11, 21, и 41 узлов. В ходе пространства / времени сгущением сетки, $\alpha \Delta t / \Delta z^2$ была фиксирована; если Δz была уменьшена на коэффициент 2, то по крайней был уменьшен на 4 раза. Для заданной пространственной дискретизации (число узлов или элементов), результаты могут быть разделены на приближенных режимов, в которых различные эффекты доминируют относительную ошибку в коэффициент чувствительности:

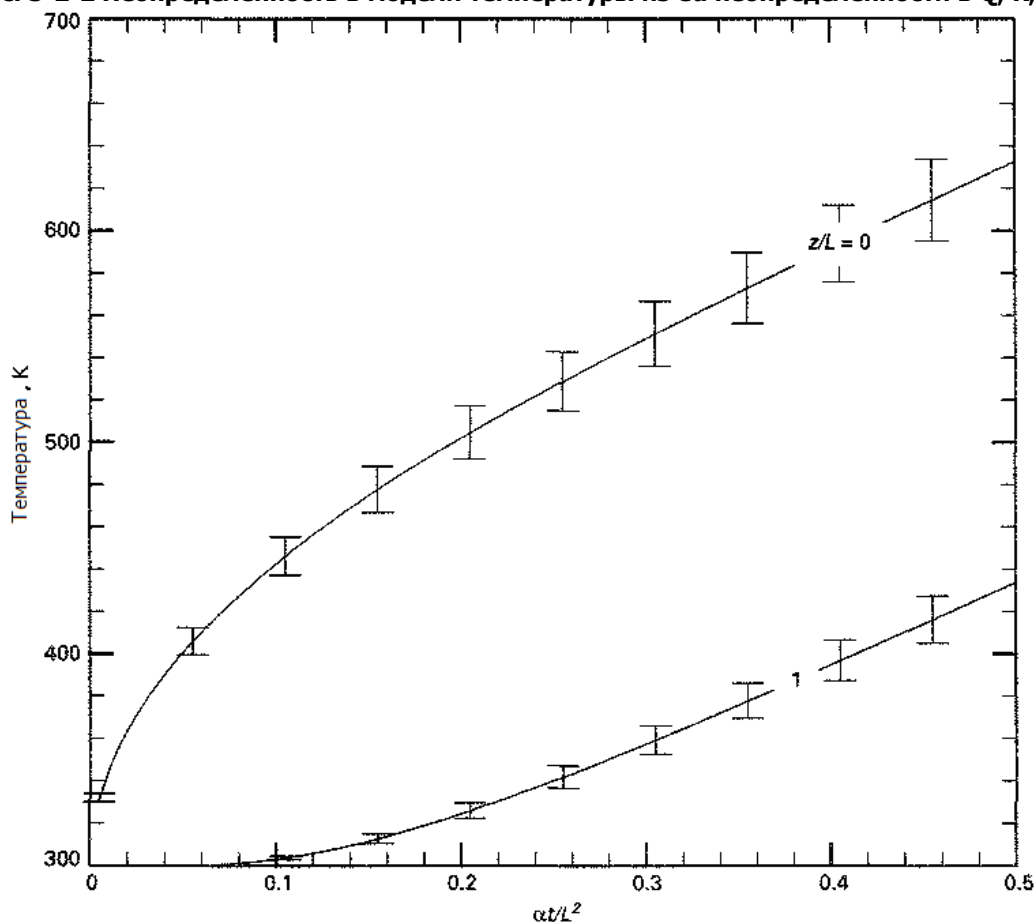
параметр дискретизации $\Delta k / k > 10^{-3}$
 пространства / времени дискретизации $10^{-9} < \Delta k / k < 10^{-3}$
 вычитания отмены $\Delta k / k < 10^{-9}$ (3-2-9)

Приведенные выше границы были определены с использованием двойной арифметики точность на 32 разрядном компьютере и следует рассматривать как нечеткое. Если либо точность или длина слова изменяется, эти границы может измениться. Для $\Delta k / k > 10^{-3}$, ошибки параметр дискретизации доминировать. Для относительно плоской части кривой ошибок на фиг. 3-2-1, пространство / время дискретизации доминирует. В этом регионе, результаты относительно независимы от МД; это область, в которой он хочет, будет функционировать. For $\Delta k / k < 10^{-9}$, вычитания отмены доминирует и ошибки могут фактически увеличить как $\Delta k / k$ производится меньше.

Диапазон $\Delta k / k$, для которых ошибка в KDT / H3 достигает стабильного минимум зависит от числа узлов. Этот диапазон шире, для крупной сетки, чем для мелкой сетки. Надеемся, что это пример даст определенный толчок для выполнения численных экспериментов при использовании метода конечных разностей в пространстве параметров.

Если второго порядка конечных разностей (в пространстве параметров) определяется формулой. (3-2-4) используется, то аналогичные результаты будут получены, за исключением, что результаты будут следовать второй опорный порядок линию вместо линии первого порядка. Решение первого порядка по сравнению с второго порядка, вероятно, будет принято на основании, может ли вычислительная бюджет позволить себе $2n + 1$ моделирования в отличие от $n + 1$ моделирования.

Рис. 3-2-2 Неопределенность в модели температуры из-за неопределенности в Q , K , и ρc_p



ОБЩЕЕ ПРИМЕЧАНИЕ: Все относительные стандартные неопределенности были 0,05. Метод среднее значение, ур. (3-2-1), был использован.

Использование эквалайзера. (3-2-1), неопределенность в компьютерной температуры из-за неопределенности входного параметра был вычислен для приведенного выше примера постоянной теплового потока. Вектор параметров для этого примера

$$X = \{q \ k \ \rho c_p\} \quad (3-2-10)$$

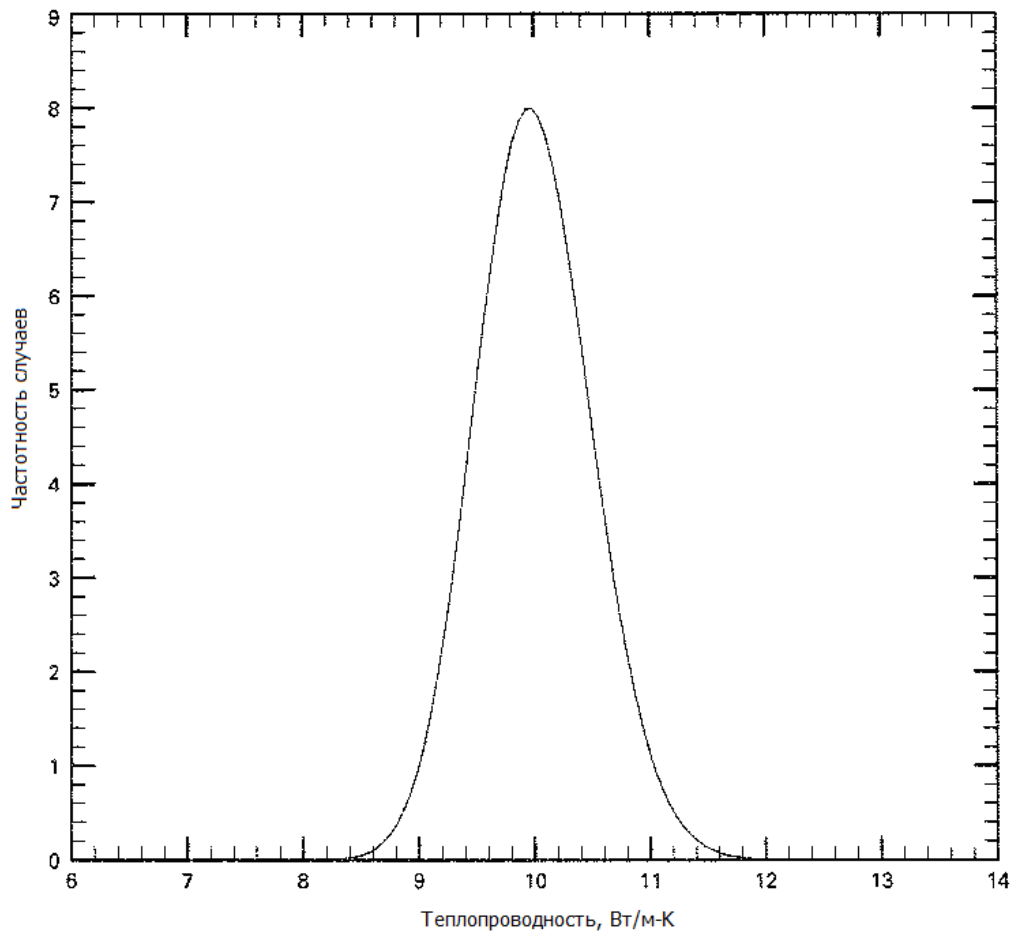
Все относительные стандартные значения неопределенности были приняты, чтобы быть $UX / X = 0,05$. Значения свойств были приведенных в уравнении. (3-2-8). Номинальный температурный отклик и соответствующую неопределенность приведен на рис. 3-2-2. Из (по оценкам) неопределенности входного параметра, стандартная неопределенность в передней температуре лица может быть столько, сколько ± 20 K. Это ± 20 K Диапазон характеризует стандартную неопределенность на выходе модели в связи с неопределенностью в модельных входных параметров.

3-3 Пробные (общие) методы для распространения параметров неопределенности

Метод коэффициент чувствительности представлены в предыдущем разделе был назван местный чувствительность и распространение неопределенности, потому что к расчету функции находятся в небольшой (локальной) окрестности среднего значения параметра. Этот подход не будет захватывать высоко нелинейное поведение в пространстве параметров; выборки на основе методов (Монте-Карло) будет восполнить этот недостаток.

Самый надежный метод отбора проб для анализа неопределенности является образцом пространство параметров с использованием полного метода Монте-Карло. Эта техника требует функции распределения для представления неопределенности в каждого параметра. Представитель функция распределения вероятности для теплопроводности показана на рис. 3-3-1; среднее значение и стандартное отклонение распределения составляет 10 Вт / мК и 0,5 Вт / мК соответственно. Случайная выборка из функции распределения каждого параметра, и стандартные статистические методы используются для вычисления среднего значения и дисперсии моделирования. Если параметры коррелируют, совместные распределения вероятностей требуется; в этом случае методы отбора проб следует должным образом учитывать корреляции между входными параметрами.

Рис. 3-3-1 Представитель функция распределения вероятностей теплопроводности



ОБЩЕЕ ПРИМЕЧАНИЕ: среднее значение и стандартное неопределенность ш Вт / мК и 0,5 Вт / мК, соответственно.

Термин "оценка функции" применяется к симуляции для одного значения вектора параметров. Число оценок функции, необходимые для статистической сходимости (результаты независимо от количества оценок функции) может лежать в диапазоне от десятков до тысяч, в зависимости от степени конвергенции требуется. Полный подход Монте-Карло является процессор. Альтернативой полной методом Монте-Карло является латинская гиперкуб выборки метод (LHS) представлены в работе [6]. В методе LHS, совокупный распределение вероятностей данной переменной делится на пш \$ (^ пр +1, как правило, когда чувствительность желательно) полос равной вероятностью. В пределах каждой группы, случайная выборка из распределения вероятностей группы. Этот процесс повторяется для каждого из параметров пр модели (или переменных), такие как теплопроводность, теплоемкость, объемной источника и т.д. Матрица значений пр nLHS X представлена в таблице 3-3-1. Столбцы в таблице 3-3-1 представляют образцы LHS для данной переменной а строки представляют собой вектора параметров модели для заданной вероятности группы. Для обеспечения полного охвата, параметры модели объединяются в случайным образом в процессе, описанном ссылками [7], [8] следующим образом: "Значения иШ5 таким образом, полученные для Xi в паре наугад и без замены со значениями wLHS полученных для Xr Эти пары NLM объединены случайным образом без замены со значениями rtLHS из X3 с образованием НЛК троек. Этот процесс продолжают до набора HLHS и ^-кортежи образуется ". Выше методика была [9] описаны в справочниках и [10] и реализован в ссылке [11]. В разделе 1 работы [10] содержит очень читаемый описание LHS. Метод LHS захватит нелинейное поведение на выборку пространстве параметров при условии, что количество образцов достаточно для статистической сходимости и функции распределения известны с достаточной точностью.

Как только моделирование была запущена для векторов параметров nLHS, стандартные статистические методы могут быть использованы для обработки результатов. Оценки ожидаемого значения (в среднем) и дисперсии отклика S задаются

$$\bar{S} = \frac{1}{n_{LHS}} \sum_{i=1}^{n_{LHS}} S_i \quad (3-3-1)$$

$$u_{input}^2 = \frac{1}{n_{LHS} - 1} \sum_{i=1}^{n_{LHS}} (S_i - \bar{S})^2 \quad (3-3-2)$$

Таблица 3-3-1 Матричное представление количества примеров LHS (n_{LHS}) и количества параметров (n_p)

↓ Зона вероятности \ Параметры →	X_1	X_2	...	X_{n_p}
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1n_p}
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2n_p}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n_{LHS}	$X_{n_{LHS}1}$	$X_{n_{LHS}2}$...	$X_{n_{LHS}n_p}$

Таблица 3-3-2 Примеры LHS для трех параметров, q , k и C

Пример	q , Вт/м ²	k , Вт/м-К	$\rho_{Cp} = C$, Дж/м ³ -К
1	378378	9.6984	3828080
2	407452	9.4573	4271520
3	438268	9.8618	4092520
4	368497	10.5484	4196800
5	399413	10.3684	4021160
6	386260	9.8795	3948668
7	403336	8.8858	3898340
8	391985	9.9936	3850160
9	412212	11.1242	4138320
10	417844	10.2519	3634980

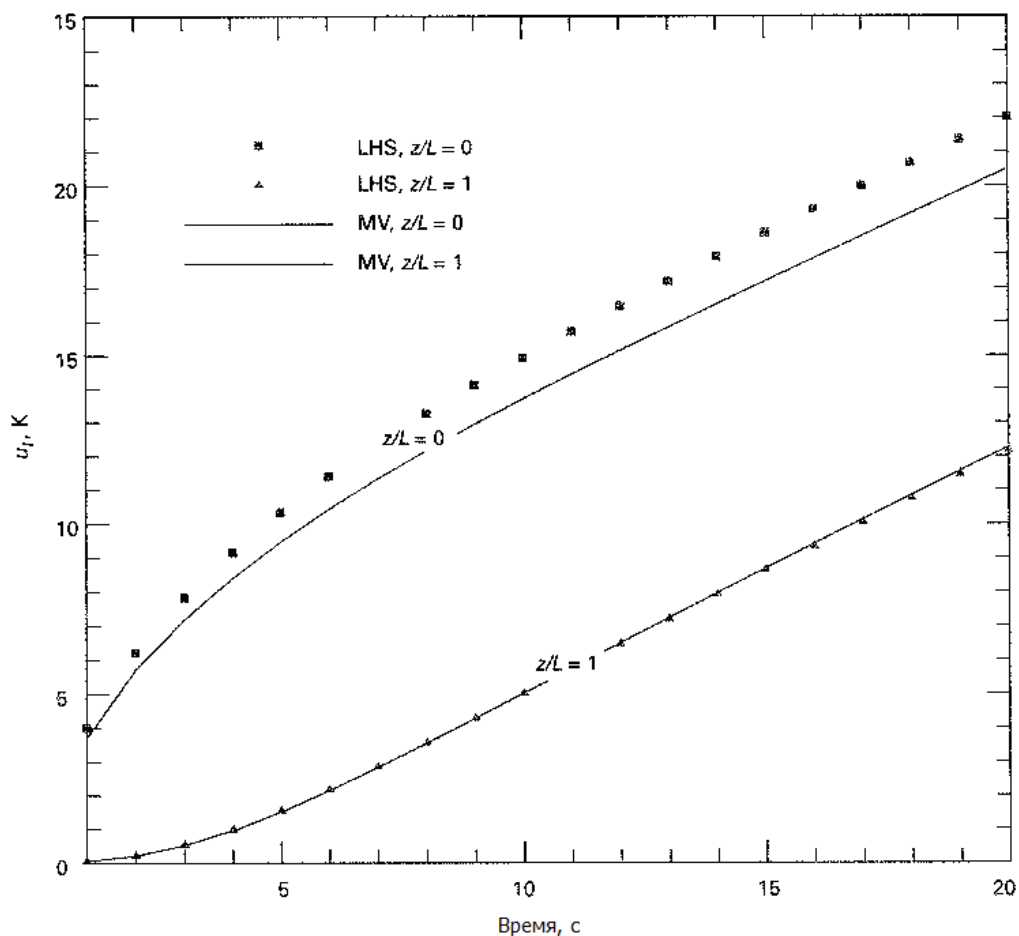
ОБЩЕЕ ПРИМЕЧАНИЕ: Родительские распределения были логнормальное с относительной стандартной неопределенности 0,05.

Если средняя реакция и его неопределенность только вещи из интереса, то вычислительный процесс будет завершен. Из результатов LHS, функция распределения S можно оценить. Поскольку функция распределения входных переменных часто предполагается, чувствительность MinpUt этому предположению могут быть изучены.

С выборки на основе методов, может быть какой-то вопрос, если количество образцов соответствовал. Один из способов ответить на этот вопрос заключается в выполнении повторов. С процедурой, LHS, это достигается путем запуска генератора случайных чисел с другим семени. Весь анализ повторяется и результаты сравниваются для различных повторах. Повторов могут быть обработаны по отдельности или в группе.

Выше методология LHS был применен к проблеме теплового потока постоянной, используемой в этом разделе. Десять LHS экспериментов с применением конечных разностей численного кода; модель содержится 11 равномерно распределенных узлов. Три переменные JQ к PCP] считались имеют независимые логнормального распределения, каждый с относительной стандартной неопределенности 0,05; соответствующие векторы параметров LHS приведены в таблице 3-3-2. Уравнения (3-3-1) и (3-3-2) были использованы для расчета среднего и стандартного отклонения узловых температур; результаты для $g/l = 0$ и 1 , показаны на рис. 3-3-2. Для сравнения, коэффициент чувствительности (среднее значение) Результаты также представлены. Эти два метода находятся в согласии для $g/l = 1$, но есть некоторые разногласия по $g/l = 0$. Поскольку и LHS и означает методы стоимостью являются приближительными, необходимы дальнейшие исследования, чтобы выяснить, какой метод является наиболее точным для этой проблемы. Метод среднее значение предполагает линейную зависимость в модели параметров; для этого примера, модель является нелинейной в k и PK . Метод LHS небольшой пример приближение к полной методом Монте-Карло; достаточное количество образцов для статистической сходимости требуется. Выводы, сделанные в отношении метода "лучших" для конкретной проблемы не может быть действительным для всех проблем.

Рис. 3-3-2 Стандартное отклонение температуры при $g/L = 0$ и 1 для постоянной тепловой поток примера Использование 10 LHS трасс и среднее значение метод ($C U / X = 0,05$)



ОБЩЕЕ ПРИМЕЧАНИЕ: Опыты сделаны с конечной разности (N узлов) числовой код.

3-4 Факторы значимости

Факторы Важность величины, которые позволяют одним оценить относительную значимость входных параметров на модель неопределенности и т. В то время как факторы важности не являются необходимыми для процесса проверки формальной, они чрезвычайно важны в том, что они помогают экспериментатор / аналитик в принятии решения, как лучше тратить ресурсы, если требуется, чтобы уменьшить и. Необязательные Приложение В представляет методы для вычисления коэффициентов значение для обеих коэффициента чувствительности и методов отбора проб.

3-5 Отдельные вопросы

Все расчеты, представленные в этом разделе, были выполнены на 32 разрядном компьютере с помощью двойной арифметики точности. Точность Компьютер будет иметь влияние на то, как маленький можно сделать конечных разностей размер шага, не встречая субтрактивные проблемы отмены.

Для тех проблем с большим (>10) числом параметров, рекомендуется мнение эксперта использоваться для уменьшения количества параметров, при которых коэффициенты чувствительности вычисляются.

В управлении большое количество симуляций, которые должны выполняться в вычислительной анализа неопределенности, своего рода языка сценариев может быть очень полезным. Некоторые программы существует, который был разработан специально для содействия этому процессу; в литературе, это называется "поставив оболочку вокруг кода анализа" [11].

Входные параметры (winput) неопределенность рассматривается как зависит от численного неопределенности (ипит). Это хороший предположение для малых возмущений параметров и конечными коэффициентами разница чувствительности. Можно показать, что ошибки сетки примерно отменить при вычислении конечные коэффициенты разница чувствительности. Для методов отбора проб, winpal может иметь зависимость от Unum для случая использования крупной сетки для отдельных образцов. Чтобы избежать этой зависимости, рекомендуется ООН У! быть вычислена на мелкой сетке, используемой для оценки Unum если оба и. . и и сравнимы по размеру. Для тех задач, в которых и «и. "То расчеты Мин ул может быть вычислена на грубой сетки.

если изменение параметра вызывает перемещение из одной режима течения к другому, то методы, представленные здесь для вычисления и, не будет работать. Примером может служить движение от ламинарного к турбулентному или наоборот. Этот эффект менее вероятно, произойдет с небольшими методов возмущений, чем с методами отбора проб.

Резонно ожидать определенное количество субъективности в оценке UX. (и связанные с ней функция рас-

пределения для LHS).

3-6 Итоговый комментарий по неопределенности параметров

По завершении разделе 3, один будет определили вклад каждого параметра к κ_{aput} . В это время, уместно сравнить κ к S и спросить, если M_{put} больше, чем это программно приемлемым. Это важный вопрос, чтобы спросить, не зависит от процесса проверки. Если ответ на поставленный выше вопрос да, то отдельные вклад в U , Должны быть шпильки СВУ чтобы определить, какие ошибки параметров следует уменьшить. Дальнейшая работа может потребоваться для снижения неопределенности в доминирующих параметров, которые в свою очередь приведет к сокращению u_{put} . Если ответ отрицательный, то можно приступить к оставшейся части процесса проверки приведенной в разделах с 4 по 7.

3-7 Список литературы

- [1] Blackwell, B. F. and Dowding, K. J., "Sensitivity Analysis and Uncertainty Propagation of Computational Models," in Minkowycz, W. J., Sparrow, E. M., and Murthy, J. Y., Handbook of Numerical Heat Transfer, 2nd ed., Wiley, New York, 2006, pp. 443-469.
- [2] Anon, "ADIFOR 2.0 Automatic Differentiation of Fortran," World Wide Web page, <http://www-unix.mcs.anl.gov/autodiff/ADIFOR>.
- [3] Martins, J. R. R. A., "A Guide to the Complex-Step Derivative Approximation," World Wide Web page, <http://mdolab.utias.utoronto.ca/resources/complex-step>.
- [4] Eca, L. and Hoekstra, M., "On the Influence of the Iterative Error in the Numerical Uncertainty of Ship Viscous Flow Calculations," Proceedings of 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, September 2006.
- [5] Beck, J. V., Blackwell, B. F., and St. Clair, C. R., Inverse Heat Conduction, Wiley, New York, 1985.
- [6] McKay, M. D., Conover, W. J., and Beckman, R. J., "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," Technometrics, Vol. 21, 1979, pp. 239-245.
- [7] Helton, J. C. and Davis, F. J., "Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 81, 2003, pp. 23-69.
- [8] Helton, Jon C. and Davis, Freddie J., "Sampling Based Methods," in Saltelli, A., Chan, K., and Scott, E. M., editors, Sensitivity Analysis, Wiley, New York, 2000, pp. 101-153.
- [9] Iman, R. L. and Shortencarier, M. J., "A FORTRAN 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use With Computer Models," Tech. Rep. SAND83-2356, Sandia National Laboratories, March 1984.
- [10] Wyss, G. D. and Jorgensen, K. H., "A User's Guide to LHS: Sandia's Latin Hypercube Sampling Software," Tech. Rep. SAND98-0210, Sandia National Laboratories, February 1998.
- [11] Eldred, M. S., Adams, B. M., Haskell, K., Bohnhoff, W. J., Eddy, J. P., Gay, D. M., Griffin, J. D., Hart, W. E., Hough, P. D., Kolda, T. G., Martinez-Canales, M. L., Swiler, L. P., Watson, J. P., and Williams, P. J., 2007. "DAKOTA: A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis. Version 4.1 Users Manual," Sandia Technical Report SAND2006-6337, Updated September 2007.
- [1] Блэквелл, BF и Dowding, KJ, "Анализ чувствительности и неопределенности Распространение вычислительные модели," в Minkowycz, W. J., Воробей, Е. М. и Мурти, JY, Справочник по численному теплообмена, 2
- [2] Анон, "ADIFOR 2.0 Автоматическая Дифференциация Fortran," Всемирная паутина страницы, <http://www-unix.mcs.anl.gov/autodiff/ADIFOR>.
- [3] Мартинс, JRR, "Руководство по комплекс-Step производного приближении" Всемирная паутина страницу, <http://mdolab.utias.utoronto.ca/resources/complex-step>.
- [4] ЭКА, Л. и Hoekstra, M., "О влиянии итерационного погрешности численного неопределенности расчетов Корабль вязкого течения," Труды 26-й симпозиум по военно-морской гидродинамики, Рим, Италия, сентябрь 2006.
- [5] Бек, СП, Блэквелл, BF, и Сент-Клер, CR, Обратная теплопроводности, М.: Мир, 1985.
- [6] Маккей, доктор медицинских наук, Коновер, WJ, и Бекман, RJ, "Сравнение трех методов для выбора значений входных переменных в анализе выходе из компьютерного кода," Technometrics, Часть 21, 1979, стр. 239-245
- [7] Элтон, JC и Дэвис, FJ, "Латинский Гиперкуб Отбор проб и распространения неопределенности в Анализы сложных систем," Надежность Инжиниринг и для обеспечения безопасности, Vol. 81, 2003, стр. 23-69.
- [8] Элтон Джон С. и Дэвис, Фредди Дж., "Выборочные методы, основанные," в Сальтелли А., Чан, К., и Скотт, Е. М., редакторы, Анализ чувствительности, Мир, М., 2000, стр. . 101-153.
- [9] Иман, RL и Shortencarier, МЮ, "Фортран 77 Программа и руководство пользователя для генерации Латинской Гиперкуба и Случайные Образцы для использования с компьютерных моделей," Технический отчет SAND83-2356, Национальные лаборатории Сандии, март 1984.
- [10] Висс, Г. Д. и Йоргенсен, К. Х., "Руководство Auser к LHS: Сандиа Латинской Гиперкуб дискретизации Программное обеспечение," Технический отчет SAND98-0210, Национальные лаборатории Сандии, февраль 1998.
- [11] Элдред, М. С., Адамс, В. М., Haskell, K., Bohnhoff, WJ, Эдди, JP, Гей, Д. Гриффин, доктор юридических наук, Харт, МЫ, Хью, PD, Колда, ГТГ, Мартинес-Каналес, ML, Swiler, LP, Уотсон, ДП, и Уильямс, PJ, 2007 "Dakota: Многоуровневая Параллельный объектно-ориентированного программирования для оптимизации конструкции, оценкой их параметров неопределенности количественной и анализ чувствительности версии 4.1 Руководство пользователя,.". Технический отчет Сандии SAND2006-6337, Обновле-

ГЛАВА 4. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

4-1 Обзор

В данном разделе представлены основные понятия из экспериментального анализа неопределенности, которые используются при определении неопределенности результата опыта, U_j в ур. (1-5-10). Стандарт ASME [1] на эту тему, PTC 19.1-2005, испытания Неопределенность, считается документом компаньоном для V & V 20. Данный раздел содержит обзор основных методологии в PTC 19.1.

Процесс проверки зависит от того, соответствующий экспериментальный результат, который имеет количественные оценки неопределенности, UD . Кроме того, эксперимент будет обеспечивать многие из входов моделирования и связанных с ними неопределенностей. Это имеет решающее значение для модельер и экспериментатор работать вместе в дизайне эксперимента проверки. Эксперимент будет реальность Интересно, что модельер пытается имитировать. Предварительные результаты моделирования может помочь в разработке эксперимента и в правильном описании и размещению аппаратуры.

4-2 Анализ экспериментальной неопределенности

Принятые стандарты для экспериментального анализа неопределенности являются ссылками [1] и [2]. Процесс, используемый в экспериментальной анализ неопределенности является вычисление неопределенности отдельных измеряемых параметров, а затем использовать их для оценки неопределенности результата (ов) определяется из этих переменных. Для измеряемой величины X , общая ошибка вызвана несколькими источниками ошибок. Сумма всех этих ошибок для измерения представляет собой разность между значением измерения, определенной в эксперименте и истинным значением измеряемой величины. В экспериментальных программ, поправки к измерения производятся для этих ошибок, которые известны, как и в процессе калибровки. Для тех ошибок, где величина и знак неизвестны, оценки неопределенности сделаны представлять дисперсию возможных значений ошибок. Обе ссылки [1] и [2] использовать стандартное отклонение для каждого источника ошибок рассчитать неопределенность в измеряемой переменной. Этот стандарт количество отклонение называется стандартная неопределенность и.

В работе [2], эти неопределенности сгруппированы по способу их оценки. Те, которые рассчитываются с помощью статистических средств, классифицируются как типа А и те, которые оцениваются с помощью других средств, классифицируются как тип В. работе [1] использует эту классификацию, но также включает в себя группировку неопределенности по их влияния на измеряемой переменной. Эти неопределенности из источников ошибок, которые способствуют изменчивости измерения классифицируются как случайные и эти неопределенности из источников ошибок, которые остаются фиксированной в процессе измерения классифицируются как систематический характер. Дискуссия ниже использует случайные и систематические классификации обсудить неопределенность измерения и неопределенность результата теста.

4-2.1 Погрешность измерения

Систематическое стандартная неопределенность измерения переменной получается из квадратного корня из суммы квадратов системы стандартных неопределенностей для всех независимых источников ошибок. Для каждого систематического источника ошибки, экспериментатор должен оценить систематическую стандартную неопределенность, b .. Систематические стандартные неопределенности оцениваются из предыдущего опыта, калибровочных данных, аналитических моделей и применения здравого смысла инженерной [3]. Систематическое стандартная неопределенность для переменной X . Тогда

$$b_i = \sqrt{b_{i_1}^2 + b_{i_2}^2 + \dots + b_{i_n}^2} \quad (4-2-1)$$

В качестве примера, рассмотрим термопару, которая была вычислена по отношению к стандарту с систематическим стандартной погрешностью $0,10^\circ \text{C}$. Когда коррекции калибровки применяется, исправлена ошибка термопары заменяется неопределенности калибровки и систематического стандартной неопределенности калибровочной кривой - в этом примере принимается равным $0,05^\circ \text{C}$. Если термопара затем используется для измерения средней температуры в поле потока, дополнительный неопределенность может должны быть применены для объяснения, как хорошо измерение термопары фактически представляет собой среднюю температуру. Если эта концептуальная неопределенность (по оценкам снятия нескольких замеров или аналитического моделирования) были $0,20^\circ \text{C}$, то систематическое стандартная неопределенность для измерения термопары будет

$$b_T = \sqrt{(0.10^\circ \text{C})^2 + (0.05^\circ \text{C})^2 + (0.20^\circ \text{C})^2} = 0.23^\circ \text{C} \quad (4-2-2)$$

Оценки систематических неопределенностей обычно делаются в какой-то доверительном уровне, а не на стандартном уровне отклонения. Как правило, эти систематические оценки неопределенности являются репрезентативными для 95% пределы возможных значений систематической погрешности. Для получения систематического стандартную неопределенность, распределение предполагается для этого 95% оценки (т.е. нормально, прямоугольные, треугольные), и оценка разделена на соответствующий коэффициент распределения (2 для нормального, 1,65 для прямоугольная и т.д.), чтобы преобразовать 95% оценка на стандартном отклонении [1].

Оценка в диапазоне от случайной ошибки для измерения переменного X ; является стандартное отклонение, s , образец также называется случайная стандартная неопределенность. В отличие от систематической

погрешности, случайная ошибка колеблется от измерения к измерению. Чтобы отразить весь спектр возможных измеренных значений переменной, измерения, используемые для расчета случайную стандартную неопределенность должны быть приняты в пределах сроков и условий, которые охватывают изменения в переменной. Например, принимая различные образцы данных в зависимости от времени при проведении всех других условий постоянные идентифицирует случайные вариации, связанное с измерительной системой и неустойчивость исследуемого состояния. Если случайное стандартная неопределенность переменной измеряемой как ожидается, также будет представитель других возможных вариаций измерения (повторяемость условий испытаний, например), то эти дополнительные источники ошибок придется варьировать в то время как несколько образцов. Данные взяты в определить стандартную неопределенность. Если повторяемость условий испытаний не представлен в эксперименте, то этот эффект придется быть оценена в качестве дополнительного систематического стандартной неопределенности.

4-2.2 Неопределенность результата

Рассмотрим экспериментальный результат, который определяется из j измеряемых параметров, как

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_j) \quad (4-2-3)$$

Стандартная неопределенность результата, находится как

$$u_r = \sqrt{b_r^2 + s_r^2} \quad (4-2-4)$$

где b_r является систематическое стандартная неопределенность результата

$$b_r^2 = \sum_{i=1}^j \left(\frac{\partial r}{\partial X_i} b_i \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{k=i+1}^j \frac{\partial r}{\partial X_i} \frac{\partial r}{\partial X_k} b_{ik} \quad (4-2-5)$$

и s_r является случайным стандартная неопределенность результата

$$s_r^2 = \sum_{i=1}^j \left(\frac{\partial r}{\partial X_i} s_i \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{k=i+1}^j \frac{\partial r}{\partial X_i} \frac{\partial r}{\partial X_k} s_{ik} \quad (4-2-6)$$

где

b_i = систематические стандартные неопределенности измерений

s_i = Случайные стандартные неопределенности измерений

Термины b_{ik} и s_{ik} в уравнениях. (4-2-5) и (4-2-6) являются ковариация систематических и случайных стандартными неопределенностями, соответственно. Когда элементарные систематические ошибки для двух отдельно измеренных переменные связаны (например, когда датчики, используемые для измерения различных переменных, каждый откалиброваны по тому же самому стандарту), систематические ошибки, как говорят, быть соотнесены и ковариация систематических ошибок равно нулю. Значимость коррелированных систематических ошибок является то, что они могут иметь эффект либо уменьшения или увеличения неопределенности в результате.

Термин ковариация, b_{ik} , определяется суммированием продукты элементарных систематических стандартных неопределенностей для переменных i и k , которые возникают из того же источника [3].

Обычно случайные стандартные неопределенности считать независимыми, так что SFT принята за нуль. Однако могут возникнуть ситуации, когда измеряемые параметры, X , в ур. (4-2-3) может зависеть от общей, изменяющихся во времени, неслучайной источника ошибки, например, дрейф в расходе на входе к тестовой конфигурации. В этом случае, расчет случайные стандартные неопределенности для каждой переменной и расчета ОН от ур. (4-2-6) с S_{ik} принимается равным нулю может привести к неправильному определению случайной стандартной неопределенности результата. Эти случаи коррелированных случайных ошибок могут быть легко обработаны [4], вычисляя результат из уравнения. (4-2-3) каждый раз, когда X_s измеряются и затем непосредственно вычисления стандартного отклонения, множества результатов и использования, что стер в уравнении. (4-2-4), а не по формуле. (4-2-6).

Методы Монте-Карло может быть использован, чтобы найти стандартную неопределенность результата [5] вместо подход распространения дается формулами. (4-2-4) через (4-2-6). Метод Монте-Карло иллюстрируется в разделах 3,5 и 7.

4-3 Неопределенность эксперимента валидации

Экспериментальная неопределенность, используемых в процессе проверки достоверности является U_r , полученный выше,

$$U_D = U_r \quad (4-3-1)$$

Даже несмотря на то эксперимент будет иметь как систематические и случайные ошибки и связанные с ними стандартные неопределенности, неопределенность результата опыта для процесса проверки будет оканчивали как систематический стандартной неопределенности [3]. Таким образом, для целей процесса валидации, экспериментальный результат имеет единственное значение, фиксированное (но неизвестный) ошибку, и только систематический компонент неопределенности.

4-4 Выводы

В этом разделе представила основные понятия, необходимые для определения неопределенности экспе-

риментального результата. Как отмечалось в начале этого раздела, стандарт ASME [1] на эту тему, PTC 19.1-2005, испытания Неопределенность, считается документом компаньоном для V & V 20. PTC 19.1-2005 содержит подробные примеры применения неопределенности анализ для определения неопределенности результатов испытаний и дает практические соображения для анализа неопределенности в целом.

4-5 Список литературы

[1] ASME PTC 19.1-2005, Test Uncertainty.

[2] ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (1995), ISO, Geneva, Switzerland.

[3] Coleman, H. W. and Steele, W. G., Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2009.

[4] Coleman, H. W. and Lineberry, D. L., "Proper Estimation of Random Uncertainties in Steady State Testing," AIAA Vol. 44, No. 3, 2006.

[5] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of Measurement Data—Supplement 1 to the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' — Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method," JCGM 101:2008, France, 2008.

[1] ASME PTC 19.1-2005, Испытания Неопределенности.

[2] Руководство ИСО по выражению неопределенности измерений (1995), ИСО, Женева, Швейцария.

[3] Коулман, HW и Стил, PG, эксперименты, проверки и анализ неопределенности для инженеров. 3-е изд., Джон Уайли и сыновья, Нью-Йорк, 2009.

[4] Коулман, HW и Линеберри, DL, "Правильное оценивания случайных неопределенностей в устойчивом состоянии тестирования," AIAA Vol. 44, № 3, 2006.

[5] Объединенный Комитет по Гиды в метрологии, "Оценка измерения Data-дополнения 1 к" Руководства по выражению неопределенности измерений" - пропаганда распределений с использованием метода Монте-Карло", JCGM 101:2008, Франция, 2008.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВАЛИДАЦИИ

5-1 Обзор

В данном разделе описывается, как неопределенность проверки u_{val} определяется один раз оценки U_{num} и неопределенность вклад в u_{input} и UD были сделаны, как описано в предыдущих разделах.

Обсуждаемые в данном разделе два подхода для определения u_{val} , которые отличаются способом распространения, с которой оценивает для u_{input} и UD получаются. Первый использование коэффициента чувствительности метода (местный), а второй является использование метода Монте-Карло (выборки, глобальной). Оба подхода иллюстрируются в течение четырех например случаи, которые охватывают широкий спектр применения V & V.

Первые три случая рассматриваются следующие за ребрами-трубки, например теплопередачи (обсуждается в разделе 1 и в обязательном Приложении I и схематически показано на рис. 1-4-1), в котором происходит следующее.

5-1.1 Случай 1

Переменная проверки Чтобы непосредственно измеряется.

5-1.2 Случай 2

Переменная д проверки является результатом определяется уравнением сжатия данных, который сочетает в переменные, измеренные в эксперименте (и никакие измеряемые параметры не одни и те же источники ошибок).

5-1.3 Случай 3

Переменная д проверки является результатом определяется уравнением сжатия данных, который сочетает в переменные, измеренные в эксперименте и измерения T и поделиться идентичные источники ошибок.

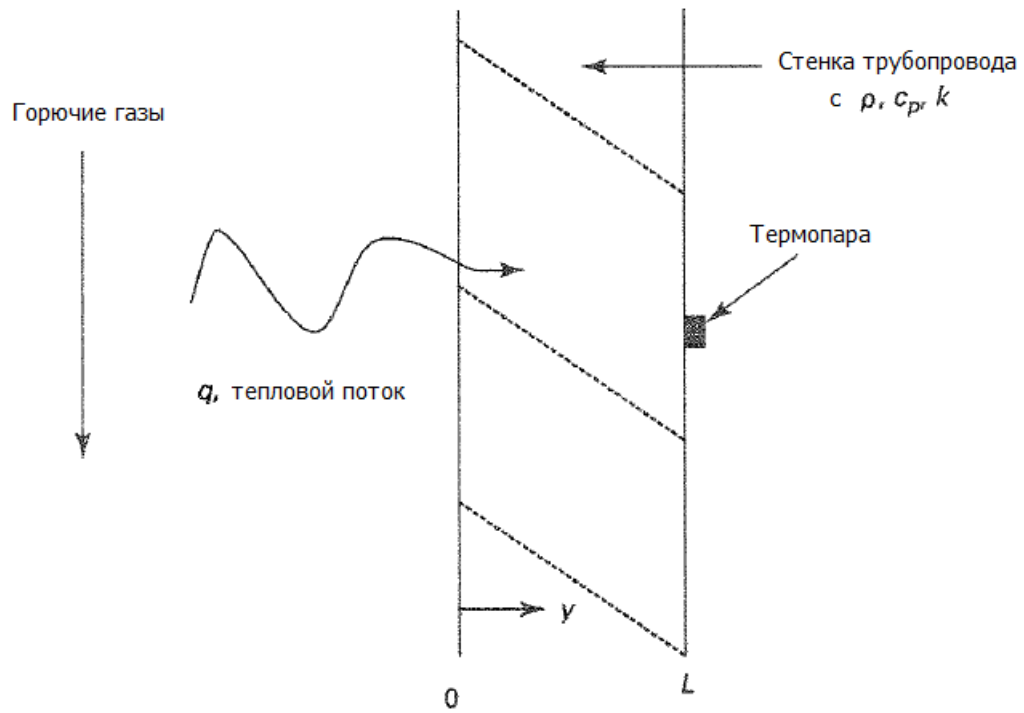
В этих случаях, спецификация условия проверки (уставки) требуется экспериментальное определение стоимости числа Рейнольдса ($4\rho Q/\mu r \sqrt{D}$), и так как моделирование выполняется для реальных условиях эксперимента, значения переменных из эксперимента будет вкладом в симуляции. Ошибки в этих входов предполагаются некоррелированными для всех случаев, за исключением T. и T для случая 3.

Четвертый случай рассматривает поток сгорания с переменной проверка будучи стенок воздуховода теплового потока д в данном месте (рис. 5-1 -1). Экспериментальная д выводится из измерений температурно-временных на внешний сгорания стенки канала, используя уравнение сокращения данных, которая сама по себе модель. Предсказанный д от моделирования с использованием химической реакции турбулентного потока кода для моделирования потока через канал.

5-2 Оценка u_{val} когда экспериментальное значение D переменной валидации определяется прямым измерением (пример 1)

Этот случай, в котором экспериментальное значение D переменной валидации непосредственно измеряется. Ключевой особенностью таких случаев является то, что D и S не имеют общих переменных, что приводит к прямой оценки u_{input} и UD .

Рис. 5-1-1 Схема для горения потоке газа в канале с тепловым потоком от стены будучи проверка переменной (Случай 4)



Анализ является более сложным в тех случаях, для которых D и S поделились переменные, как показано в п. 5-3.

Для ребристых трубки теплопередачи эксперименте, показанном на фиг. 1-4-1, рассмотрим случай, в котором переменная проверки определяется как непосредственно измеряемой температуры после масса жидкости TD. Затем

$$S = T_{o,S} \quad (5-2-1)$$

$$D = T_{o,D} \quad (5-2-2)$$

$$E = S - D = T_{o,S} - T_{o,D} \quad (5-2-3)$$

Функциональная зависимость результата моделирования представлена

$$T_{o,S} = T_{o,S}(T_i, T_\infty, Q, \rho, \mu, C_p, h_1, h_2, h_f, h_c, k_f, k_r, d_1, d_2, L, a, w_f, w_{nf}) \quad (5-2-4)$$

где имитационные модели условиям эксперимента, так что значения за эксперименте используются в качестве вклада в симуляции. Выражение для сравнения ошибки затем

$$E = T_{o,S}(T_i, T_\infty, Q, \rho, \mu, C_p, h_1, h_2, h_f, h_c, k_f, k_r, d_1, d_2, L, a, w_f, w_{nf}) - T_{o,D} \quad (5-2-5)$$

5-2.1 Чувствительность коэффициент подход (Случай 1)

Как обсуждалось в подразделе 1-5, так как переменная проверки T измеряется непосредственно, предположение о эффективно независимых ошибок и N_{put} и CD является разумным. Выражение для MVAL от ур. (1-5-10)

$$u_{val}^2 = u_{num}^2 + u_{input}^2 + u_{T_{o,S}}^2$$

с определяется формулой. (3-2-1) с его корреляции условиях, равных нулю

$$u_{input}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial T_{o,S}}{\partial X_i} u_{X_i} \right)^2$$

которые для этого конкретного случая выражаются так

$$\begin{aligned}
u_{\text{input}}^2 = & \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial T_i} \right)^2 u_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial T_\infty} \right)^2 u_{T_\infty}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial Q} \right)^2 u_Q^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial \rho} \right)^2 u_\rho^2 \\
& + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial \mu} \right)^2 u_\mu^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial C_p} \right)^2 u_{C_p}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial h_1} \right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial h_2} \right)^2 u_{h_2}^2 \\
& + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial h_f} \right)^2 u_{h_f}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial h_c} \right)^2 u_{h_c}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial k_f} \right)^2 u_{k_f}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 \\
& + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial d_1} \right)^2 u_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial d_2} \right)^2 u_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial L} \right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial a} \right)^2 u_a^2 \\
& + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial w_f} \right)^2 u_{w_f}^2 + \left(\frac{\partial T_{o,s}}{\partial w_{nf}} \right)^2 u_{w_{nf}}^2
\end{aligned} \tag{5-2-6}$$

Производные в ур. (5-2-6) оцениваются с помощью процедур раздела 3. Стандартная неопределенность, Юта, определяется с использованием методики, рассмотренные в разделе 4.

Метод коэффициент чувствительности требует знания о только номинальных значений входных параметров и связанных с ними стандартными неопределенностями. Знание о форме распределений не требуется.

Неопределенность существует в состоянии проверки установки из-за неопределенностей в параметрах, определяющих установки. Применяя коэффициент чувствительности подход к ур. (1-4-2) приводит к

$$u_{\text{Re}}^2 = \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial \rho} \right)^2 u_\rho^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial Q} \right)^2 u_Q^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial \mu} \right)^2 u_\mu^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial d_1} \right)^2 u_{d_1}^2 \tag{5-2-7}$$

Производные в ур. (5-2-7) можно оценить аналитически из-за простой формы Re.

Графическое резюме процедур, используемых для оценки UML с использованием подхода распространения коэффициент чувствительности показано на рис. 5-2-1. Процедуры, определенные в предыдущих разделах, используются для оценки все стандартные неопределенности и частные производные.

5-2.2 Подход Монте-Карло (Случай 1)

Рисунок 5-2-2 иллюстрирует подход Монте-Карло для этого случая. В отличие от подхода коэффициента чувствительности, метод Монте-Карло требует, чтобы распределения вероятностей можно считать за ошибки во входных параметров. Стандартные неопределенности, и, как правило, принимается за стандартные отклонения предполагаемых распределений. Для данного "запустить" я моделирования, случайная выборка берется из каждой из этих распределений и в результате моделирования, S_i , экспериментальный результат, D_i , ошибки сравнения проверка, E_i , и точка проверки, Re_i , являются рассчитывается. Этот процесс повторяется N раз, и в результате средние значения и стандартные отклонения значений $N E_i$ и Re_i оценены.

Заметим, что поскольку каждый S_i включает в себя (по существу) и ту же E_i , эффект E_i не наблюдается в изменчивости

Распределение значений к.ванных S_i или E_i эффект численного неопределенности в периоде, когда и входит в расчет Увал.

Количество образцов N можно уменьшить, используя методы, обсуждаемые в разделе 3.

5-3 Оценка u_{val} когда экспериментальное значение D переменной валидации определяется из уравнения сокращения данных (примеры 2 и 3)

Когда переменная проверки не измеряется непосредственно, а определяется из уравнения восстановления данных с использованием других измеряемых параметров, оценка u_{val} ут и UD (и впоследствии MVAL) становится более сложным. Пример Случаи 2 и 3 иллюстрируют применение подхода проверки в таких обстоятельствах. Наиболее общий вид уравнения распространения коэффициента чувствительности, поскольку это относится к этим случаям представлена первая, с формой для каждой из двух конкретных случаях, то, представленных в подразделах следующих.

Рис. 5-2-1 Чувствительность коэффициент распространения подход к оценке u_{val} когда проверка переменной (T_o) измеряется непосредственно (Случай 1)

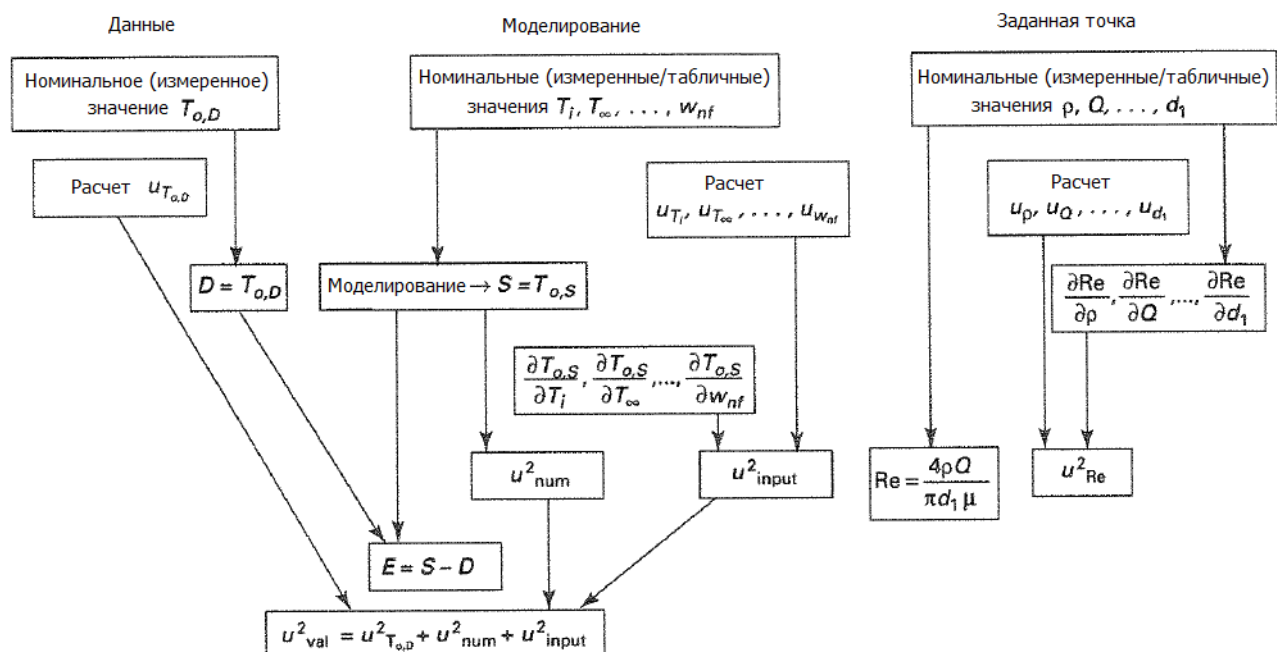
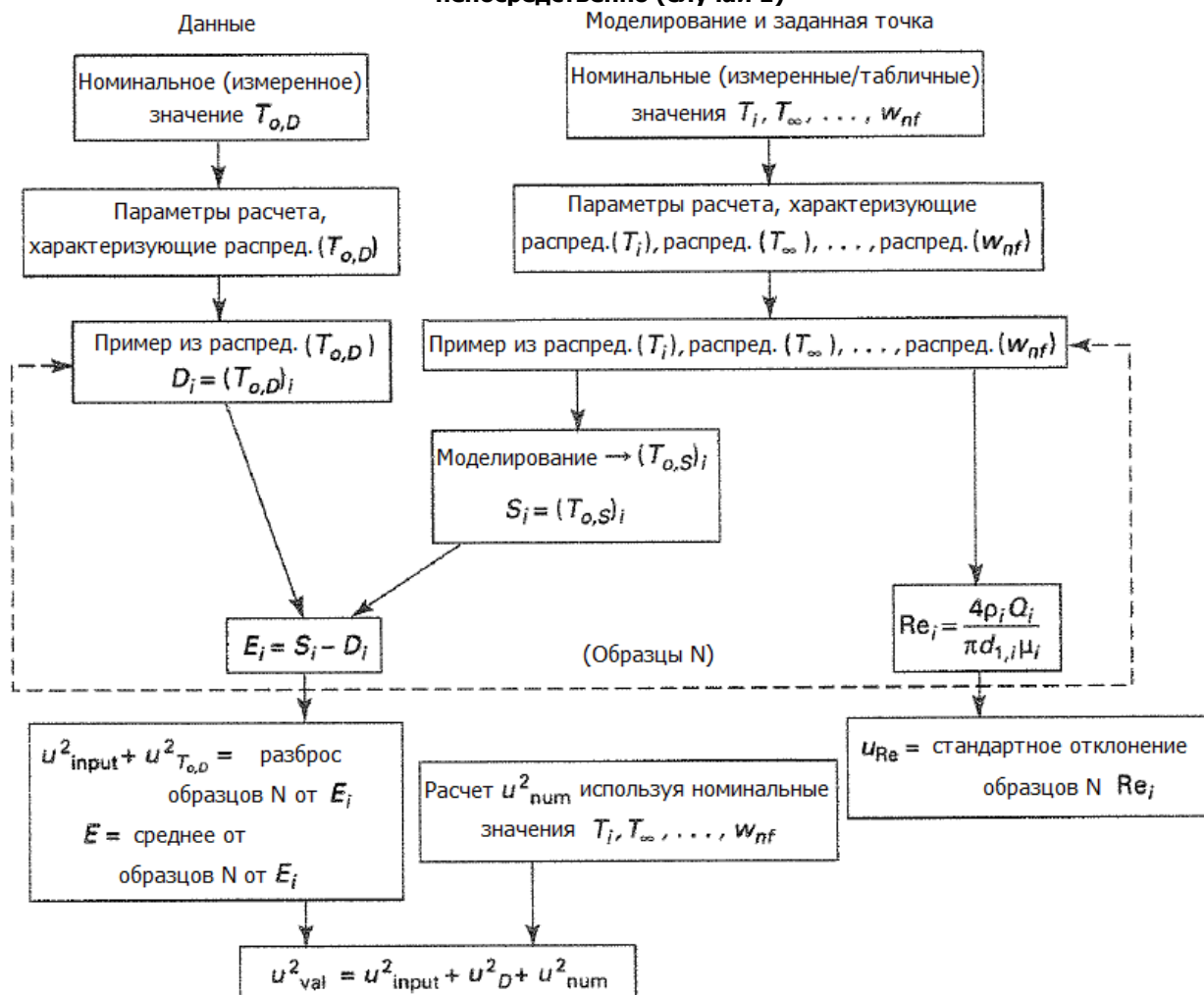


Рис. 5-2-2 Подход Монте-Карло к оценке u_{val} когда проверка переменной (T_o) измеряется непосредственно (случай 1)



Рассмотрим общую ситуацию, в которой переменная проверки является результатом определяется из уравнения восстановления данных, содержащей J переменные x_j , и некоторые из измеряемых параметров может делиться идентичные источники ошибок. Уравнение для ошибки сравнения является то [ссылаясь эк-вайзеров. (1-5-4) и (1-5-6)]

$$E = S(x_1, x_2, \dots, x_j) - D(x_1, x_2, \dots, x_j) \\ = \delta_{\text{model}} + \delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D \quad (5-3-1)$$

В этом случае, S и D не может быть обоснованно считать независимыми, так как S и D поделится зависимость от тех же измеренных величин. Применение подхода распространения коэффициента чувствительности к получим выражение для Юваль урожайности

$$u_{\text{val}}^2 = \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_1} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_1} \right) \right]^2 u_{x_1}^2 + \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_2} \right) \right]^2 u_{x_2}^2 + \dots \\ + \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_j} \right) \right]^2 u_{x_j}^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_1} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_1} \right) \right] \\ \times \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_2} \right) \right] u_{x_1 x_2} + \dots + u_{\text{num}}^2 \quad (5-3-2)$$

где есть термин ковариация содержащий а фактор и для каждой пары x переменных, которые разделяют одинаковые источники ошибок [1]. Там нет явное выражение для «input», как его компоненты объединить неявно с компонентами M2D. Уравнение (5-3-2) могут быть выражены в виде, аналогичном уравнению. (1-5-10), как

$$u_{\text{val}}^2 = u_{\text{num}}^2 + u_{\text{input}+D}^2 \quad (5-3-3)$$

где

$$u_{\text{input}+D}^2 = \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_1} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_1} \right) \right]^2 u_{x_1}^2 + \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_2} \right) \right]^2 u_{x_2}^2 + \dots \\ + \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_j} \right) \right]^2 u_{x_j}^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_1} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_1} \right) \right] \\ \times \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_2} \right) \right] u_{x_1 x_2} + \dots + 2 \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_{j-1}} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_{j-1}} \right) \right] \\ \times \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\partial D}{\partial x_j} \right) \right] u_{x_{j-1} x_j} \quad (5-3-4)$$

Методы оценки коэффициентов чувствительности моделирования прогнозируемого значения по отношению к переменным (DS / dx), обсуждаются в разделе 3. Оценка Mnum производится с использованием методов в разделе 2.

5-3.1 Нет измеряемых параметров Поделитесь идентичные источники ошибок (Случай 2)

Опять же, используя оребренной трубы эксперимент-теплопередачи в качестве примера, рассмотрим теперь случай, в котором переменная проверка интерес d, скорость передачи тепла, заданной 1-D в среднем сохранения уравнения энергии в качестве

$$q = \rho Q C_p (T_i - T_o) \quad (5-3-5)$$

и никакие измерения не имеют общих источников ошибок. Важно отметить несколько моментов. Во-первых, скорость теплопередачи не измеряется непосредственно - это экспериментальный результат определяется из измеренных переменных и других, чьи значения находятся из справочных источников (свойства, например). Во-вторых, поскольку ур. (5-3-5) представляет собой 1-D оператор сохранения энергии с T. и T принимается за средними впускным и выпускным температурах, нет никакой ошибки моделирования для QD понесенные при его использовании в отличие от ситуации быть обсуждается в случае 4. Тем не менее, вероятно, будут пространственной неоднородности неопределенности для TD и TD для учета того, насколько хорошо они представляют средние температуры. Поскольку нет никаких источников ошибок, разделяемые различными переменными, все точки ковариационными в ур. (5-3-2) равны нулю. В этом примере предполагается, что моделирование предсказывает T и вычисляет d использованием входных значений P, Q, CP, и T_i.

Выражение ошибка сравнение

$$E = S - D = q_s - q_D \quad (5-3-6)$$

где

$$q_s = \rho Q C_p [T_{i,D} - T_{o,S} (T_i, T_o, Q, \rho, \mu, C_p, \\ h_1, h_2, h_f, h_c, k_f, k_i, d_1, d_2, L, a, w_f, w_{np})] \quad (5-3-7)$$

и

$$q_D = \rho Q C_p (T_{i,D} - T_{o,D}) \quad (5-3-8)$$

5-3.1.1 Чувствительность Коэффициент подход (Случай 2).

Для этого случая MVAL дается формулами. (5-3-3) и (5-3-4), где $u_{input+D}$ выражается в

$$\begin{aligned}
 u_{input+D}^2 = & \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho} \right) \right]^2 u_{\rho}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial Q} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial Q} \right) \right]^2 u_Q^2 \\
 & + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial C_p} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial C_p} \right) \right]^2 u_{C_p}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right]^2 u_{T_i}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{\infty}} \right)^2 u_{T_{\infty}}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial \mu} \right)^2 u_{\mu}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_1} \right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_2} \right)^2 u_{h_2}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_f} \right)^2 u_{h_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_c} \right)^2 u_{h_c}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_f} \right)^2 u_{k_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial d_1} \right)^2 u_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial d_2} \right)^2 u_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial L} \right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial a} \right)^2 u_a^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial w_{ff}} \right)^2 u_{w_{ff}}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial w_{nf}} \right)^2 u_{w_{nf}}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right)^2 u_{T_{o,D}}^2
 \end{aligned}
 \tag{5-3-9}$$

Уравнение (5-2-7) используется для оценки неопределенности в заданной точке, Re. Рисунок 5-3-1 иллюстрирует применение чувствительности уравнения подхода к этому делу.

5-3.1.2 Монте-Карло подход (Случай 2). Метод Монте-Карло показано на рис. 5-3-2. Предполагается, что распределения вероятностей для ошибок в экспериментально измеренных величин и погрешностей в других входных параметров; стандартные факторы неопределенности и взяты быть стандартные отклонения предполагаемых распределений, и дисперсия выборки N значений E , берется в качестве оценки $u_{input+D}$.

Рис. 5-3-1 Чувствительность Коэффициент распространения подход к оценке u_{val} когда валидации переменных определяется уравнением данных сокращения, который сочетает переменных в эксперименте (случай 2)

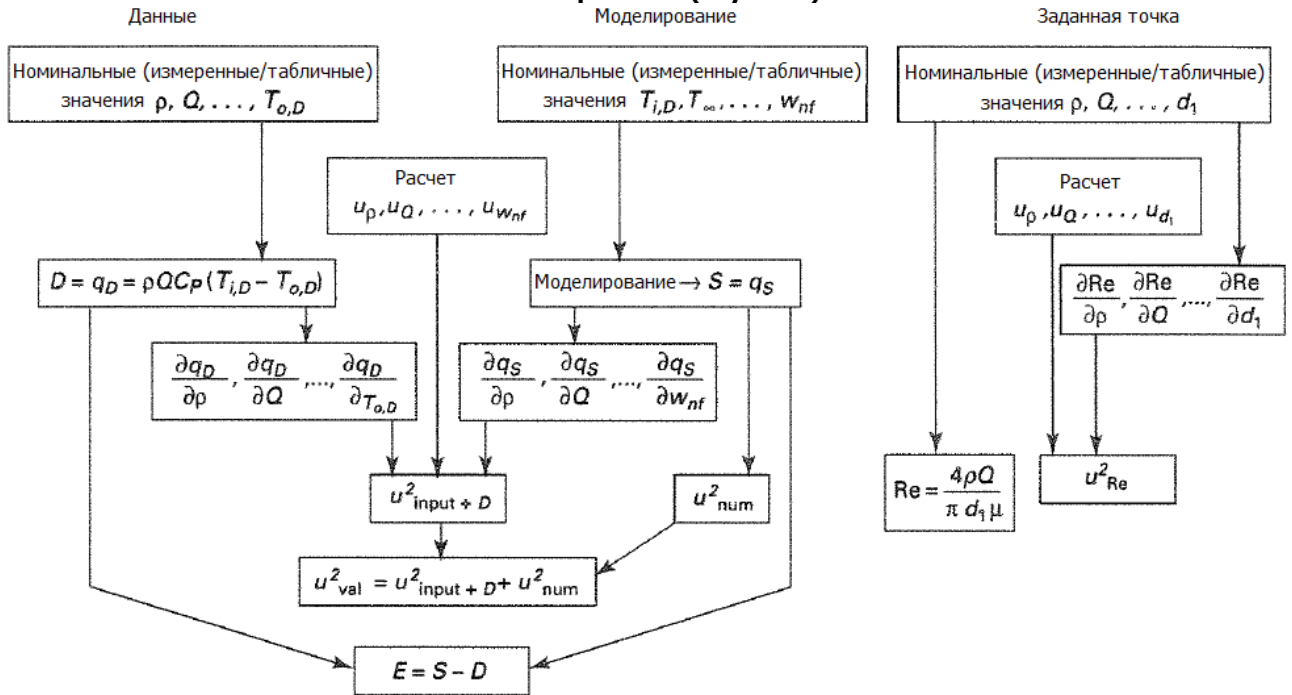


Рис. 5-3-2 Монте-Карло подход к оценке u_{val} когда валидации переменных определяется уравнением данных сокращения, который сочетает переменных в эксперименте (случай 2)

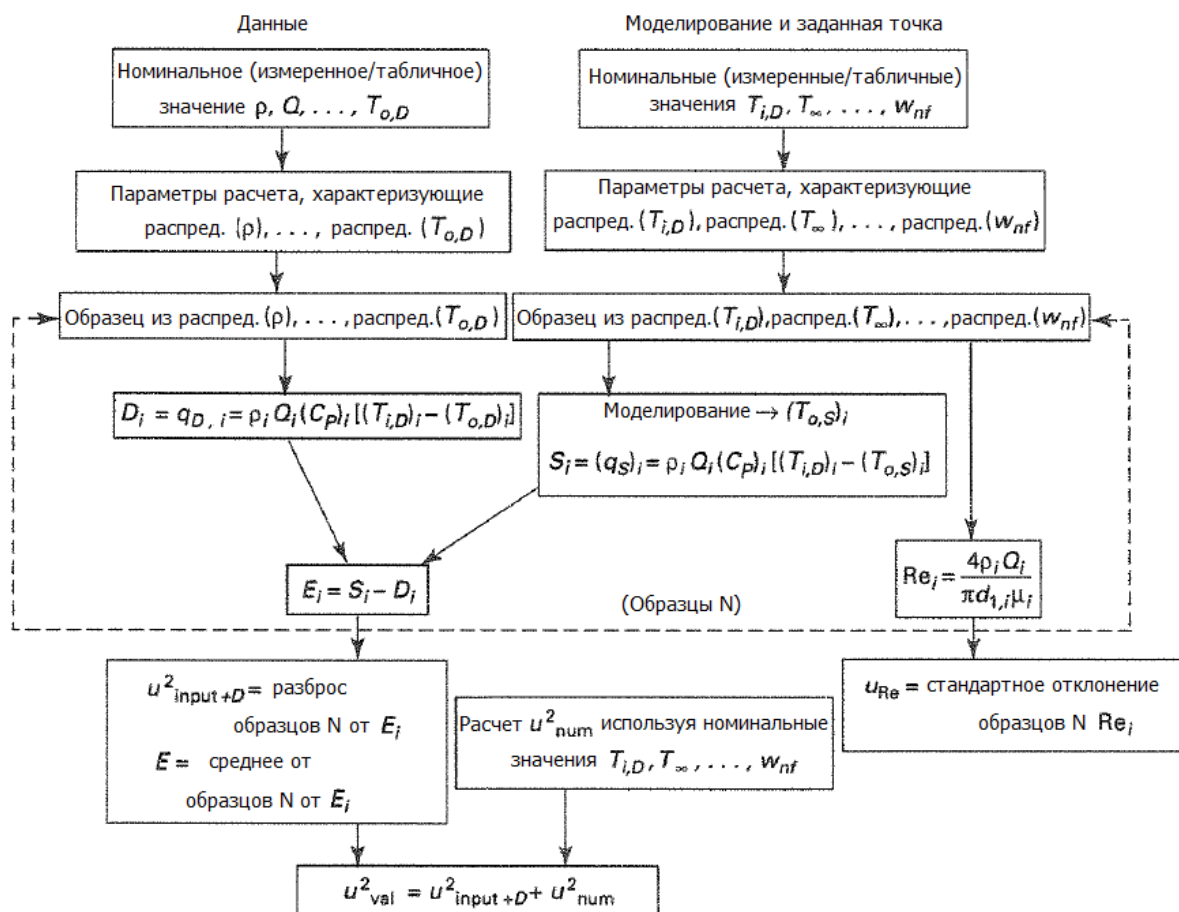
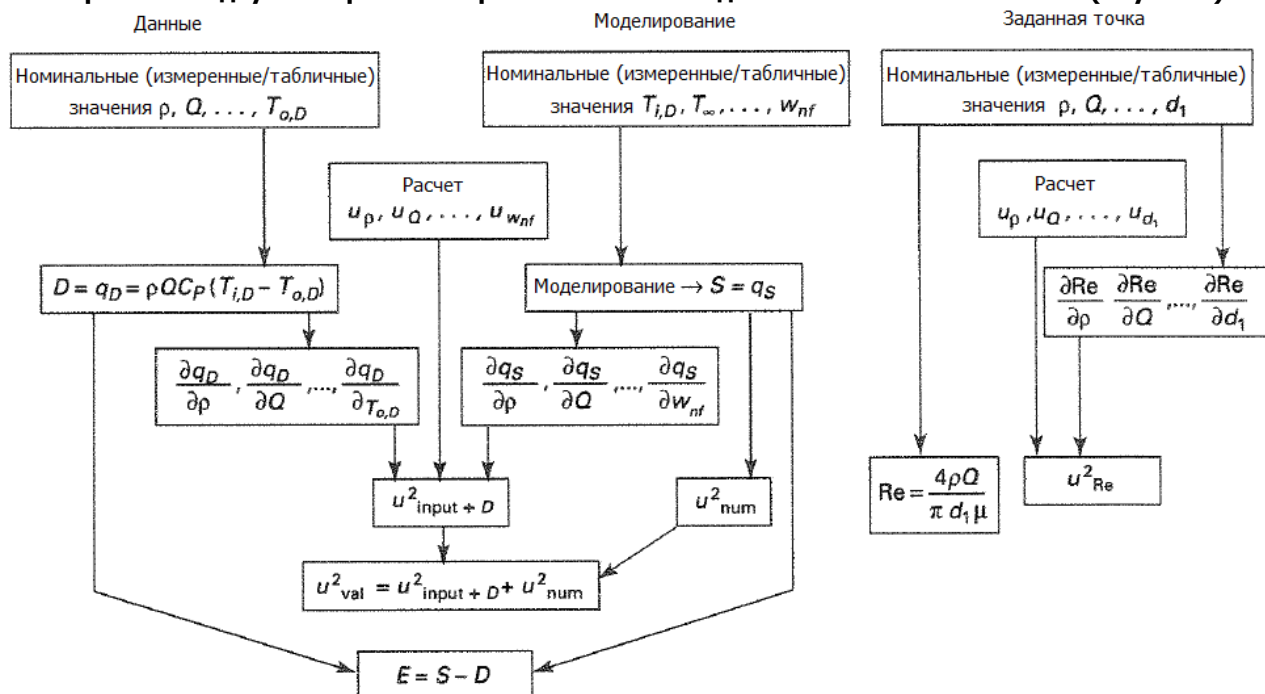


Рис. 5-3-3 Чувствительность Коэффициент распространения подход к оценке u_{val} когда валидации переменных определяется уравнением редукции данных, который сочетает переменных в эксперименте и двух измеренных переменных имеют одинаковое Источник ошибки (Случай 3)



5-3.2 Измеряемые параметры придерживаются одинаковых источников ошибок (Случай 3)

Теперь рассмотрим, что измеренные температуры T_i и T_o поделится идентичный источник ошибки (например, оба преобразователя температуры калибруется против того же стандарта, и поэтому, после внесения поправок калибровки, оставляя каждый датчик с погрешностью стандарта в общий). Выражения ошибок сравнения являются, как указано в уравнениях. (5-3-6) через (5-3-8) в пункте. 5-3.1.

5-3.2.1 Чувствительность Коэффициент подход (Случай 3).

Для этого случая нга | дается формулами. (5-3-3) и (5-3-4) где и. . _ Выражается в виде

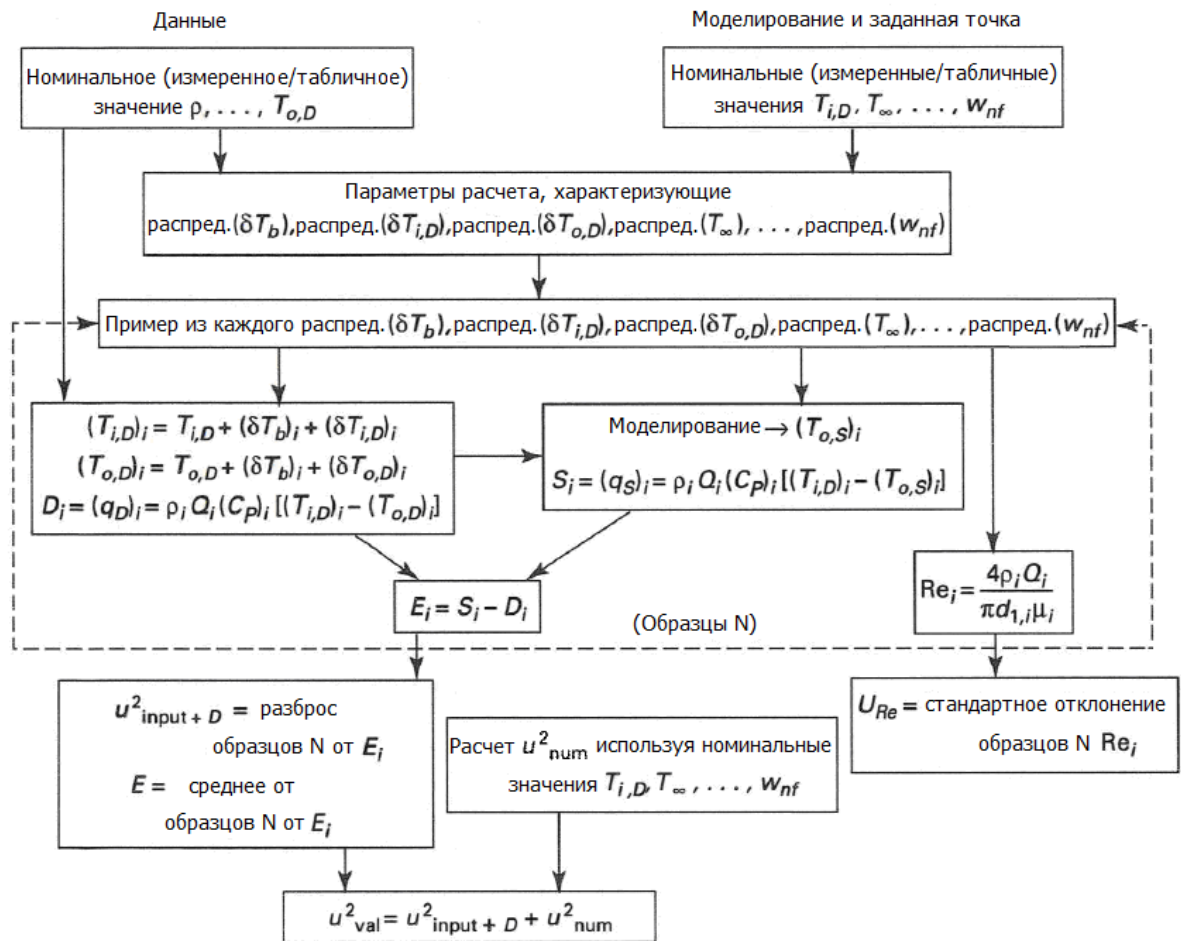
$$\begin{aligned}
u_{input+D}^2 = & \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho} \right) \right]^2 u_{\rho}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial Q} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial Q} \right) \right]^2 u_Q^2 \\
& + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial C_p} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial C_p} \right) \right]^2 u_{C_p}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{ij}} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{ij}} \right) \right]^2 u_{T_{ij}}^2 \\
& + \left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{\infty}} \right)^2 u_{T_{\infty}}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial \mu} \right)^2 u_{\mu}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_1} \right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_2} \right)^2 u_{h_2}^2 \\
& + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_f} \right)^2 u_{h_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_c} \right)^2 u_{h_c}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_f} \right)^2 u_{k_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 \\
& + \left(\frac{\partial q_s}{\partial d_1} \right)^2 u_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial d_2} \right)^2 u_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial L} \right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial a} \right)^2 u_a^2 \\
& + \left(\frac{\partial q_s}{\partial w_f} \right)^2 u_{w_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial w_{nf}} \right)^2 u_{w_{nf}}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right)^2 u_{T_{o,D}}^2 \\
& + 2 \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{ij}} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{ij}} \right) \right] \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{o,D}} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right) \right] u_{T_{ij}T_{o,D}}
\end{aligned} \tag{5-3-10}$$

где конечный член в уравнении это термин, ковариация, что принимает во внимание тот факт, что измененные значения T_{ij} и $T_{o,D}$ поделены ошибкой из того же источника. С Q_S не зависит от T_D , что производное в заключительный период равно нулю.

Уравнение (5-2-7) используется для оценки неопределенности в заданной точке, Re. Рисунок 5-3-3 иллюстрирует применение распространения подхода коэффициента чувствительности к этому примеру случая.

5-3.2.2 Монте-Карло подход (Случай 3). В подходе Монте-Карло, вероятностные распределения для ошибок в экспериментально измеренных величин и погрешностей в других входных параметров, как предполагается; стандартные факторы неопределенности и взяты быть стандартные отклонения предполагаемых распределений; и дисперсия выборки N значениях E . берется в качестве оценки « $2input + D$ » Процедура показана на рис. 5-3-4. В этом случае ошибка с Distr (STB) в ванную из общего одинаковой систематического источника ошибки и та же ошибка присваивается как (T) и (TD) для заданного iteration.⁹ (⁹ В общем, только некоторые элементарные источники систематических ошибок будет то же самое для T_D и T_{No} и другие элементарные источники, не будет тем же самым. Такие ситуации подробно описаны в [1]).

Рис. 5-3-4 Монте-Карло Распространение подход к оценке u_{val} когда валидации переменных определяется уравнением редукции данных, который сочетает переменных в эксперименте и два Измеряемые параметры имеют одинаковое источник ошибки (случай 3)



5-4 Оценка u_{val} когда экспериментальное значение D переменной валидации определяется из уравнения сокращения данных, которое само является моделью (пример 4)

Рассмотрим случай дымовых газов, проходящих через канал, с переменной валидации интерес будучи тепловой поток Q падает на конкретной области стенке воздуховода. Ситуация показана схематически на фиг. 5-1-1. В результате моделирования d прогнозируется с использованием кода, что модели турбулентного химически реагирующих потоков в условиях эксперимента. Входы будут геометрии, ракетного топлива и окислителя скорость потока и т.д. химическое равновесие код, который вычисляет свойства газообразных продуктов сгорания могут быть рассмотрены, чтобы быть частью имитационной модели (по аналогии с общей обработки моделей турбулентности и их параметров в анализе CFD) или это может считаться частью входных параметров с вкладов неопределенности учтены в u_{input} .

Поток тепла экспериментальный определяют путем измерения температуры в задней стенке ($Y = L$) воздуховода в зависимости от времени, t . Измеренная $T(t)$ История затем используется в обратном модели восстановления данных проводимости [2], чтобы вывести поток тепла падающий на $y = 0$. Модель обработки данных можно предположить, 1-D проводимость, постоянные или переменные свойства стены, падающий тепло постоянный поток со временем, адиабатическое стены на $y = L$, и т.д. при таком подходе, экспериментальный результат, QD , теперь содержит ошибки из категории, аналогичные при моделировании (то есть, ошибка из-за предположений и приближений в модели восстановления данных обозначается модель SD) 'т ^ ле ошибке привет модель сокращение выходных данных из-за ошибок в входов (измеренных и из справочных источников) обозначается δD_{input} ; и ошибка из-за численного решения модели восстановления данных обозначается D , мин.

Проверка ошибок сравнение в этом случае имеет вид

$$E = S - D = q_s - q_D = \delta_{s,model} + \delta_{s,input} + \delta_{s,num} - \delta_{D,model} - \delta_{D,input} - \delta_{D,num} \quad (5-4-1)$$

Если SD модель не (или не может быть) оценивается с погрешностью, то две ошибки моделирования не отличаются индивидуально и суммарная погрешность моделирования дается

$$\begin{aligned}\delta_{\text{model,total}} &= (\delta_{S,\text{model}} - \delta_{D,\text{model}}) \\ &= E - (\delta_{S,\text{input}} + \delta_{S,\text{num}} - \delta_{D,\text{input}} - \delta_{D,\text{num}})\end{aligned}\quad (5-4-2)$$

Теперь u_{val} определяется как стандартной неопределенности, соответствующей стандартному отклонению родительской популяции комбинации $(\delta_{S,\text{input}} + \delta_{S,\text{num}} - \delta_{D,\text{input}} - \delta_{D,\text{num}})$.

Функциональные соотношения для QS и QD задаются

$$q_S = q_S(x_1, x_2, \dots, x_j) \quad (5-4-3)$$

где J отличается x : являются входами в имитационной модели, и

$$q_D = q_D(\rho, c_p, k, L, T, t) \quad (5-4-4)$$

Понимая, что моделирование поля течения и экспериментальная модель обработки данных имеет стенки воздуховода, выражения для результатов QS и QD не содержат общих переменных, как и в случаях 2 и 3.

5-4.1 Чувствительность Коэффициент подход (Случай 4)

Чувствительность коэффициент подход в этом случае дает

$$\begin{aligned}u_{\text{val}}^2 &= \left(\frac{\partial q_S}{\partial x_1}\right)^2 u_{x_1}^2 + \dots + \left(\frac{\partial q_S}{\partial x_j}\right)^2 u_{x_j}^2 + u_{S,\text{num}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho}\right)^2 u_{\rho}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial c_p}\right)^2 u_{c_p}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial k}\right)^2 u_k^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial L}\right)^2 u_L^2 \\ &+ \left(\frac{\partial q_D}{\partial T}\right)^2 u_T^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial t}\right)^2 u_t^2 + u_{D,\text{num}}^2\end{aligned}\quad (5-4-5)$$

определяющий

$$u_{S,\text{input}}^2 = \left(\frac{\partial q_S}{\partial x_1}\right)^2 u_{x_1}^2 + \dots + \left(\frac{\partial q_S}{\partial x_j}\right)^2 u_{x_j}^2 \quad (5-4-6)$$

и

$$u_{D,\text{input}}^2 = \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho}\right)^2 u_{\rho}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial c_p}\right)^2 u_{c_p}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial k}\right)^2 u_k^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T}\right)^2 u_T^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial t}\right)^2 u_t^2 \quad (5-4-7)$$

выражение для UVA | становится

$$u_{\text{val}}^2 = u_{S,\text{input}}^2 + u_{S,\text{num}}^2 + u_{D,\text{input}}^2 + u_{D,\text{num}}^2 \quad (5-4-8)$$

Рисунок 5-4-1 иллюстрирует этот случай.

5-4.2 Монте-Карло подход (Случай 4)

Как и в предыдущих случаях, распределения вероятностей ошибок в эксперименте и ошибок во входных параметрах, как предполагается, и стандартные неопределенности, и, взяты быть стандартные отклонения предполагаемых распределений. Неопределенность проверки определяется как показано на фиг. 5-4-2.

5-5 Предположения и вопросы

Резюме соответствующих предположений и вопросов, касающихся этих двух методов для распространения неопределенности посредством уравнений сокращения данных и моделирования и проверки многоточечных модель следующим образом.

Рис. 5-4-1 Чувствительность коэффициент распространения подход к оценке u_{val} когда валидации переменных определяется уравнением отбора данных, которые сами являются модели (Случай 4)

Предположения и вопросы, связанные с подходом распространения коэффициента чувствительности, как по типам проверки, приведены ниже.

(а) В то время как чувствительность коэффициент подход распространение как правило, требует меньше оценки имитационной модели, чем подхода Монте-Карло, количество оценок могут быть значительными. Для моделей с очень большим числом входных параметров, некоторые усилия могут быть необходимы для выявления тех параметров, которые оказывают существенное влияние на прогнозирования в модели условий (заданное значение) эксперимента проверки. Анализ чувствительности распространения может быть ограничено этими параметрами.

(б) Метод, представленный, предполагает, что средняя имитационная модель выхода, значит (S), и неопределенность на выходе модели из-за входных параметров, «вход, может быть оценена от номинальных значений входных параметров, и из анализа чувствительности первого порядка. Эти предположения могут не подходить, если модель очень нелинейная во входных параметрах, в диапазонах параметров, связанных с стандартной неопределенности параметров около заданного значения. Следует отметить, что проверочные эксперименты часто выполняются в тщательно контролируемых условиях, что приводит к меньших диапазонов для неопределенностей в входных параметров, чем может возникнуть в этой области.

(в) преимущество способа распространения коэффициента чувствительности это требует только, чтобы номинальное значение (или среднее значение) и стандартная погрешность (стандартное отклонение) модели входных параметров и данных охарактеризовать. Метод Монте-Карло требует полную спецификацию распределений неопределенности, если каждый не принимает подход, изложенный в подпункте (б) пункта. 5-5.2.

(г) Нельзя, без дополнительных предположений, характеризуют интервал, в течение которого Smodel падает, с фиксированным уровнем вероятности. Способ характеризует только E и UVA, а не распределение свя-

зано с неопределенностью в $(\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D)$.

5-5.2 Монте-Карло Распространение подход

Предположения и вопросы, связанные с подходом Монте-Карло, так как они относятся к модели проверки, приведены ниже.

(а) подход Монте-Карло требует, чтобы количество оценок имитационной модели быть достаточно большим [3], таких, что предсказание среднее модель и стандартная неопределенность мкм и (может быть решена).

(б) Распределения важных параметров модели должен быть указан. Если достаточные знания не существует, чтобы указать любой из этих дистрибутивов ряд распределений и связанных с ними распределения параметров могут быть использованы (нормальный, форму и т.д.), чтобы оценить чувствительность анализа проверки в распределительных выбора.

(в) В то время как количество оценок моделирования, необходимых методу Монте-Карло, чтобы адекватно оценить среднее (S), а и. . не превосходит слабой зависимости от числа параметров модели (не функции, если случайные образцы из независимых, одинаковых распределений [3]), обязательно должны быть указаны распределения параметров, используемых в анализе. Как и в случае метода распространения неопределенности, некоторые усилия могут быть необходимы для выявления тех параметров, которые оказывают существенное влияние на прогнозирования в модели условий (уставки) эксперимента проверки, так что распределения, связанные с этими параметрами, не важно необходимости не могут быть охарактеризованы.

(г) Моделирование Монте-Карло может быть выполнена на более грубой сетке, если будет установлено, что Mnum для этой сетки значительно меньше, чем и. Использование моделирования на основе сетки, для которых и составляет порядка и. позволит значительно увеличить УЯ |, что приводит к ситуации, когда значительная часть расчетной стандартной неопределенности, wval является из-за ограничений в области расчета, а не в связи с неопределенностью в эксперименте проверки (то есть, те, которые связаны с неопределенностью, связанной с измерениями и параметры, используемые при моделировании эксперимента).

(д) Метод дает оценку распределения для неопределенности в Smodel на основе неопределенности в (Sin-put + 5 -С.А. Распределение может быть использован для оценки интервала, в котором Smodel падает, с заданной вероятностью как вероятность увеличивается (говорят, от 95% до 99%), количество оценок моделирования, необходимых для решения хвосты увеличивается распределения.

5-5.3 последствия для Multipoint Проверка

Процедура документально здесь могут быть применены для характеристики ошибки модели для нескольких заданных значений. Настоящий стандарт, однако, не содержит указаний о том, как результаты могут быть интерполяцией (или экстраполировать) в другие установок. Некоторые вопросы возникают в интерполяции. Они включают в себя выбор функции интерполяции и характеристику статистике остатков (то есть, форма распределения, корреляции между остатками на различных заданных значений, а также оценки из распределения параметров). Такие вопросы выходят за рамки настоящего стандарта.

5-6 Список литературы

[1] Coleman, H. W. and Steele, W. G., Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York (2009).
[2] Beck, J. V., Blackwell, B. E, and St. Clair, C. R., Inverse Heat Conduction, Wiley, New York (1985).
[3] Fishman, G. S., Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications, Springer, New York (1995).

[1] Коулман, HW и Стил, РГ, эксперименты, проверки и анализ неопределенности для инженеров, 3-е изд., Джон Уайли и Сыновья, Нью-Йорк (2009).
[2] Бек, Дж. В., Блэквелл, В. Е и Сент-Клер, С. R "Обратная теплопроводности, Мир, М., (1985).
[3] Фишман, GS, Монте-Карло: концепции, алгоритмы и приложения, Springer, Нью-Йорк (1995).

ГЛАВА 6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВАЛИДАЦИИ

6-1 Введение

В предыдущих разделах этого документа представили методологию проверки основан на определении проверки ошибку сравнения, E , а неопределенность проверки, δ , и в этом разделе рассматриваются интерпретацию сравнения этих показателей. Учтите, что после усилий проверки достигает точки, где значение моделирования, S , и экспериментальное значение, D , переменной валидации бы определена, знак и величина E ($= S - D$) известны.

Неопределенность проверки UVA] является оценкой стандартного отклонения родительской популяции комбинации всех ошибок, кроме ошибки моделирования ($\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D$) в S и D . Методы для оценки компонентов неопределенности δ_{num} , δ_{input} , и δ_D , что в совокупности дают δ_{total} были обсуждены в разделах 2, 3 и 4, соответственно. Оценка δ_{total} от этих компонентов неопределенности была продемонстрирована в разделе 5 для четырех отдельных случаях, которые представляют практические сценарии проверки. Для каждого из случаев, вклады δ_{input} и δ_D в δ_{total} определяются распространения моделирования входных стандартных неопределенностей и экспериментальных стандартных неопределенностей с использованием двух методов: коэффициент чувствительности (локальный) подход и Монте-Карло (отбор проб, глобальный) подход что требует уточнения распределений ошибок.

Ссылаясь на ур. (1-5-7)

$$\delta_{\text{model}} = E - (\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D) \quad (1-5-7)$$

и с учетом определения UMT, очевидно, что

$$(E \pm u_{\text{val}})$$

затем характеризует интервал, в течение которого δ_{total} падает, или

$$\delta_{\text{model}} \in [E - u_{\text{val}}, E + u_{\text{val}}]$$

Таким образом, E является оценкой δ_{model} , и u_{val} является стандартная неопределенность этой оценки. Неопределенность проверки таким образом, может рассматриваться как стандартной неопределенности, δ , см. δ_{model} .

6-2 Интерпретация результатов валидации с использованием E и u_{val} без предположений о распределениях ошибок

Если у человека есть только оценку неопределенности проверки, u_{val} а не оценки распределения вероятностей, связанных с $(\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D)$, интервала, в пределах которого значение δ_{model} падает с заданной вероятностью не могут быть оценены без дополнительных предположений. Можно сделать следующие заявления, однако:

(а) Если

$$|E| > u_{\text{val}} \quad (6-2-1)$$

то, возможно, $\delta_{\text{model}} \approx E$.

(б) если

$$|E| \leq u_{\text{val}} \quad (6-2-2)$$

то, возможно, δ_{model} имеет тот же порядок, что и $(\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D)$.

С практической точки зрения, в первом случае один имеет информацию, которая, возможно, может быть использован для улучшения модели (уменьшить ошибку моделирования). Во втором случае, однако, ошибка моделирования в рамках «уровень шума», введенного численного, ввода и экспериментальных неопределенностей, и разработке модели «улучшения» является более проблематичным.

6-3 Интерпретация результатов валидации с использованием E и u_{val} с предположениями о распределениях ошибок

Для оценки интервал, в течение которого δ_{total} падает с заданной степенью уверенности, предположение о распределении вероятностей комбинации всех ошибок, за исключением ошибки моделирования, должны быть сделаны. Затем это позволяет выбор коэффициента покрытия [1,2] к такой, что

$$U_{\%} = k u \quad (6-3-1)$$

где $U_{\%}$ называется расширенная неопределенность и, можно сказать, например, что $(E \pm U_{95})$, то определяет интервал, в течение которого δ_{total} падает около 95 раз из 100 (то есть, с 95% уверенностью), когда коэффициент покрытия был выбран для уровня доверия 95%.

6-3.1 Распределения Родитель об ошибках

Для получения взгляд на порядок величины k , рассмотрим следующие три распределения родитель об ошибках, используемые в качестве примеров в Руководстве ИСО [1]:

- (а) равномерное (прямоугольный) распределение с равной вероятностью, что S лежит в любое значение от $-A$ до $+A$, так что $\text{тр} = A/\sqrt{3}$.
- (б) треугольное распределение симметрично относительно $\delta = 0$ с базой от $-A$ до $+A$, так что $a = 1/\sqrt{6}$.
- (в) распределение Гаусса с стандартным отклонением σ .

6-3.2 Покрывание фактор

Выберите коэффициент покрытия, K , такой, что $(\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D)$, конечно (или почти наверняка) падает в пределах $\pm k$ (u_{val}).

(а) Если $(\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D)$ составляет от равномерного распределения, 100% населения покрывается за $k = 1,73$.

(б) Если $(\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D)$ составляет от треугольного распределения, 100% населения покрывается за $k = 2,45$.

(в) Если $(\delta_{\text{num}} + \delta_{\text{input}} - \delta_D)$ от распределения Гаусса, 95,5% населения покрывается за $k = 2,0$, 99,7% для $k = 3,0$, 99,95% для $k = 3,5$, и 99,99% для $k = 4,0$.

С этих сравнений, можно сделать вывод, что для распределений об ошибках в «семью» из трех распределений рассматриваемых S_{model} конечно (или почти наверняка) попадает в интервале $E \pm k$ (u_{val}), где k , как правило, число в диапазоне от 2 до 3.

В случае подхода Монте-Карло, прямое вычисление интервала покрытия может быть выполнена для достаточно большого числа образцов N помощью распределение N расчетных значений E , если есть достаточное доверие выбора входных распределений. С другой стороны, такое распределение может также использоваться, чтобы оценить эквивалентную k если распределение является симметричным.

6-4 Список литературы

[1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (corrected and reprinted, 1995), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (1995).

[2] Coleman, H.W. and Steele, W.G., Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York (2009).

[1] Руководство по выражению неопределенности измерение (исправленное и перепечатывать, 1995), Международной организации по стандартизации, Женева, Швейцария, (1995).

[2] Коулман, Н.В. и Стил, Р.Г., эксперименты, проверки и анализ неопределенности для инженеров, 3-е изд., Джон Уайли и Сыновья, Нью-Йорк (2009).

ГЛАВА 7. ПРИМЕРЫ

7-1 Обзор

Чтобы продемонстрировать подход проверки в данном стандарте, пример проблема представлена. Пример применяет подходы, описанные в настоящем стандарте для решения проверки кода, проверка решения, неопределенность в модели входных параметров, неопределенность в экспериментальных данных, неопределенность проверки и интерпретации сравнению проверки. Пример основан на проверке модель для скорости передачи тепла от плавник теплообменником.

Этот раздел делится на два основных подразделов, охватывающих пример кода проверки (п. 7-2) и пример проверки (п. 7-3). В примере кода проверка включает в себя описание проблемы (пункт 7-2.1), презентация выпускаемой решения (пункт 7-2.2), и обсуждение результатов (пункт 7-2.3). Пример проверки включает в себя демонстрацию конца в конец подхода с пунктами на экспериментальных данных (пункт 7-3.2), моделирования (пункт 7-3.3), и сравнения проверки (пункт 7-3.4); дополнительный пункт (пункт 7-3.5) суммирует применяя подход проверки на второй имитационной модели. В разделе экспериментальные данные, экспериментальная неопределенность (пункт 7-3.2.1) оценивается. В разделе моделирования включает в себя обсуждение имитационной модели (пункт 7-3.3.1), представления результатов моделирования (пункт 7-3.3.2), и оценки неопределенности моделирования (проверки решение в пункте. 7-3.3. 3 и неопределенность входной параметр в пункт. 7-3.3.4). Пункт для оценки сравнение проверки представляет два подхода для расчета неопределенности проверки (Уравнение распространения подход в пункт. 7-3.4.1 и метод Монте-Карло в пункт. 7-3.4.2) и обсуждает интерпретацию результатов проверки (пункт 7-3.4.3). Подход проверка повторяется на второй имитационной модели, с результатами моделирования и неопределенности моделирования обобщенных в пункте 7-3.5.1 и результаты проверки сравнения, суммированные в пункте 7-3.5.2.

7-2 Пример верификации кода

Проверка производится для функций код в имитационной модели, применяемой в оценке валидации. Это имитационная модель (см. ниже в подразделе 7-3) включает численного решения уравнение в частных производных для линейного теплопроводности с конвекцией граничных условий. Два аналитические решения для проверки кода разработаны в Необязательные Приложении А, используя метод, изготовленных решений. Оба решения применимы к имитационной модели, используемой в примере валидации, но отличаются в особенностях кода, которые проверены. Разновидностью MMS № 1 в Необязательные Приложении А используется в данном разделе, чтобы продемонстрировать проверки кода. Решение кратко описаны здесь. Раствор был спе-

циально разработан таким образом, что математические операции, необходимые для разработки изготовлены раствор (MS) может осуществляться вручную. Тем не менее, символическое программа математика может облегчить эту задачу и, как правило, необходимо для более сложных приложений.

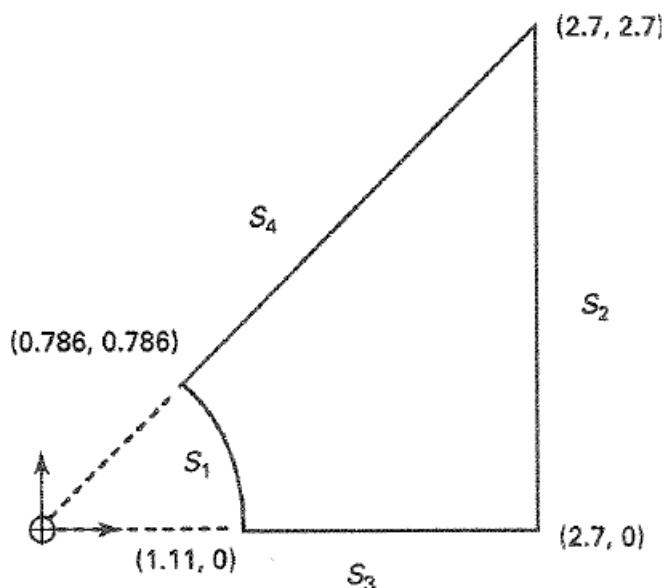
7-2.1 Описание проблемы

Линейная устойчивая теплопроводность должна быть проверена в течение двумерной области. Домен берется в качестве одной восьмой квадрата (2,7 м x 2,7 м) с круглым отверстием (1,11 м в диаметре) в центре, как показано на рис. 7-2-1. Граничные поверхности двумерной области обозначены как S, в S4. Хотя двумерная область выбрана для задачи проверки похож на двумерной области, используемой в проверке, это не требуется для проверки кода. Это делается для удобства здесь.

Уравнение в частных в коде быть проверены в том, что для линейного стационарного теплопроводности и представлено

$$k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (7-2-1)$$

Рис. 7-2-1 Проблемная область C (x, y) показаны координаты углов областей



Граничные условия, подлежащие проверке, конвективные граничные условия, заданные на поверхностях s4 и s2 как

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} &= q_n(r, \theta) \Big|_{s_1} = h_i (T|_{s_1} - T_f) \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} &= q_n(r, \theta) \Big|_{s_2} = h_o (T|_{s_2} - T_\infty) \end{aligned} \quad (7-2-2)$$

где n нормаль к поверхности.

7-2.2 Полученное решение

Способы, описанные в Разделе 2, применяются для получения аналитического решения с использованием метода, изготовленных растворов и выполнять код проверки. Выбранный аналитическое решение

$$M(r, \theta) = T_m + \cos(4\theta) \exp(r) \quad (7-2-3)$$

где

(r, t) = полярные координаты

Tm = постоянный, номинальную температуру

Решение строится в полярных координатах, но конечное элемент кода проверяется решит проблему в декартовой системе координат. Кроме того, решение разработано в безразмерных переменных для удобства; код может быть настроен на использование тех или МС преобразуется в размерных переменных.

Устойчивое уравнение теплопроводности в полярных координатах используется для получения производства решение.

$$L(T) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right] = 0 \quad (7-2-4)$$

Теплопроводность является постоянной в уравнении. (7-2-4), k = K. Следует отметить, что более общий аналитическое решение разработано в Приложении А Необязательные для проверки нелинейной теплопроводности где теплопроводность, k, является функцией температуры.

При работе на изготовленного раствора, M, в уравнении. (7-2-3), с оператором, L, в уравнении. (7-2-4), следующий набор уравнений может быть определена.

$$L(T) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right] = Q(r, \theta)$$

$$Q(r, \theta) = KM \left[1 + \frac{1}{r} - \frac{16}{r^2} \right] \quad (7-2-5)$$

Решение уравнения. (7-2-5), по определению,

$$T(r, \theta) = M(r, \theta) \quad (7-2-6)$$

Краевые условия выводятся из аналитического решения и обсудим ниже.

Краевые условия оцениваются из раствора в ур. (7-2-3) на граничных поверхностях проблемной области (рис. 7-2-1). Вдоль граничных поверхностей S3 и S4, можно показать, что нормальный поток равен нулю, так как градиент MS равна нулю. На граничных поверхностях s1 и s2, температуры, нормального потока, или конвективных условиях, типичных в термического анализа, которые могут быть заданы из этого выпускаемой решения. Аналитические формы этих граничных условий приведены в следующем.

Для заданной температуры граничного условия значение применяется из аналитического решения.

$$T(r, \theta)|_{s_1} = M(r, \theta)|_{s_1}$$

$$T(r, \theta)|_{s_2} = M(r, \theta)|_{s_2} \quad (7-2-7)$$

Указано нормальное состояние граница тепловой поток относится градиенты аналитического решения.

$$q_n(r, \theta)|_{s_1} = -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{s_1} = -K \frac{\partial M}{\partial r} = -KM$$

$$q_n(r, \theta)|_{s_2} = -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{s_2} = -K \left[\frac{\partial M}{\partial r} \cos(\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial \theta} \sin(\theta) \right]$$

$$= -KM \left[\cos(\theta) + \frac{4}{r} \tan(4\theta) \sin(\theta) \right] \quad (7-2-8)$$

Конвективный граничное условие можно прописать в двух направлениях. Во-первых, форма выбрана для температуры конвективного и требуемой коэффициента конвекции, чтобы удовлетворить граничное условие вычисляется.

$$h(r, \theta)|_{s_1} = q_n(r, \theta)|_{s_1} / [T_f(r, \theta) - M(r, \theta)]$$

$$h(r, \theta)|_{s_2} = q_n(r, \theta)|_{s_2} / [T_\infty(r, \theta) - M(r, \theta)] \quad (7-2-9)$$

где нормальный поток, q_n , вычисляется по формуле. (7-2-8). Обратите внимание, что для этого изготовленного раствора коэффициент конвекции на поверхности S2 будет иметь отрицательные значения, если выбран постоянная температура конвекции. Это связано с изменением знака в нормальном потока на поверхности S2, которая может быть продемонстрирована с ур. (7-2-8). Параметры, принимающие нефизических значений следует избегать. В этом случае либо температура конвекции могут быть сделаны пространственно изменяться или граничное условие может быть указано по-другому, как описано далее. Кроме того, коэффициент конвекции может быть выбран, и температура конвекции, чтобы удовлетворить граничное условие вычисляется.

$$T_f(r, \theta)|_{s_1} = q_n(r, \theta)|_{s_1} / h_i(r, \theta) + M(r, \theta)|_{s_1}$$

$$T_\infty(r, \theta)|_{s_2} = q_n(r, \theta)|_{s_2} / h_o(r, \theta) + M(r, \theta)|_{s_2} \quad (7-2-10)$$

Потому что граничные условия получаются из аналитического решения, различные комбинации граничных условий можно проверить с помощью той же аналитического решения. Отдельные проблемы верификации, которые проверяют комбинации температуры, нормального теплового потока, и конвективных тепловых потоков граничных условий может быть протестированы с этим одним аналитическим решением. В большинстве случаев, общий вид граничного условия, что позволяет пространственного изменения указанного количества, проверяется. Результаты представлены для одной комбинации граничных условий, которые уточняются конвективный тепловой поток на обе поверхности S1 и S2. Конвективные граничные условия применяются в имитационной модели, используемой в проверке.

На практике, если особая форма граничного условия не выполняет, как ожидалось, используя другую форму граничного условия полезно для диагностики ли производительность были вызваны конкретной форме граничного условия. Указание на зависимую переменную, в данном случае температуры, является хорошей отправной точкой в код проверки исследования отладки настройки и запуска проблему код проверки.

7-2.3 Результаты верификации кода

Неструктурированной сетки (сетки) теплопередачи код применения метода конечных элементов используется для выполнения вычислений [1]. Серия с четырьмя ячейками используется в код проверки исследования. Сетки уточнены в неструктурированной образом на внутри области; граница области уточняется в структурированном виде. Неструктурированных уточнение дает сетки, которые не имеют общих узлов на внутри обла-

сти. Неструктурированных уточнение не требуется для проверки кода. Тем не менее, в целом, неструктурированных уточнение является более строгой проверкой процедуры проверки кода, чем структурированной уточнения по причине того, что неструктурированных уточнение не имеет равномерного фактора уточнения над сеткой в то время как структурированный уточнение делает. Кроме того, для коммерческого программного обеспечения, может быть проще, чтобы получить ряд сеток рафинированных в неструктурированной форме. Серия сеток, используемых в примере, показана на рис. 7-2-2. Сетка усовершенствована таким образом, что общее число элементов в области увеличено примерно в четыре раза с каждым уточнением сетки. Характерный размер сетки, h , в зависимости от длины кромки среднего элемента (см. ниже) снижается приблизительно в два раза в каждом уточнении.

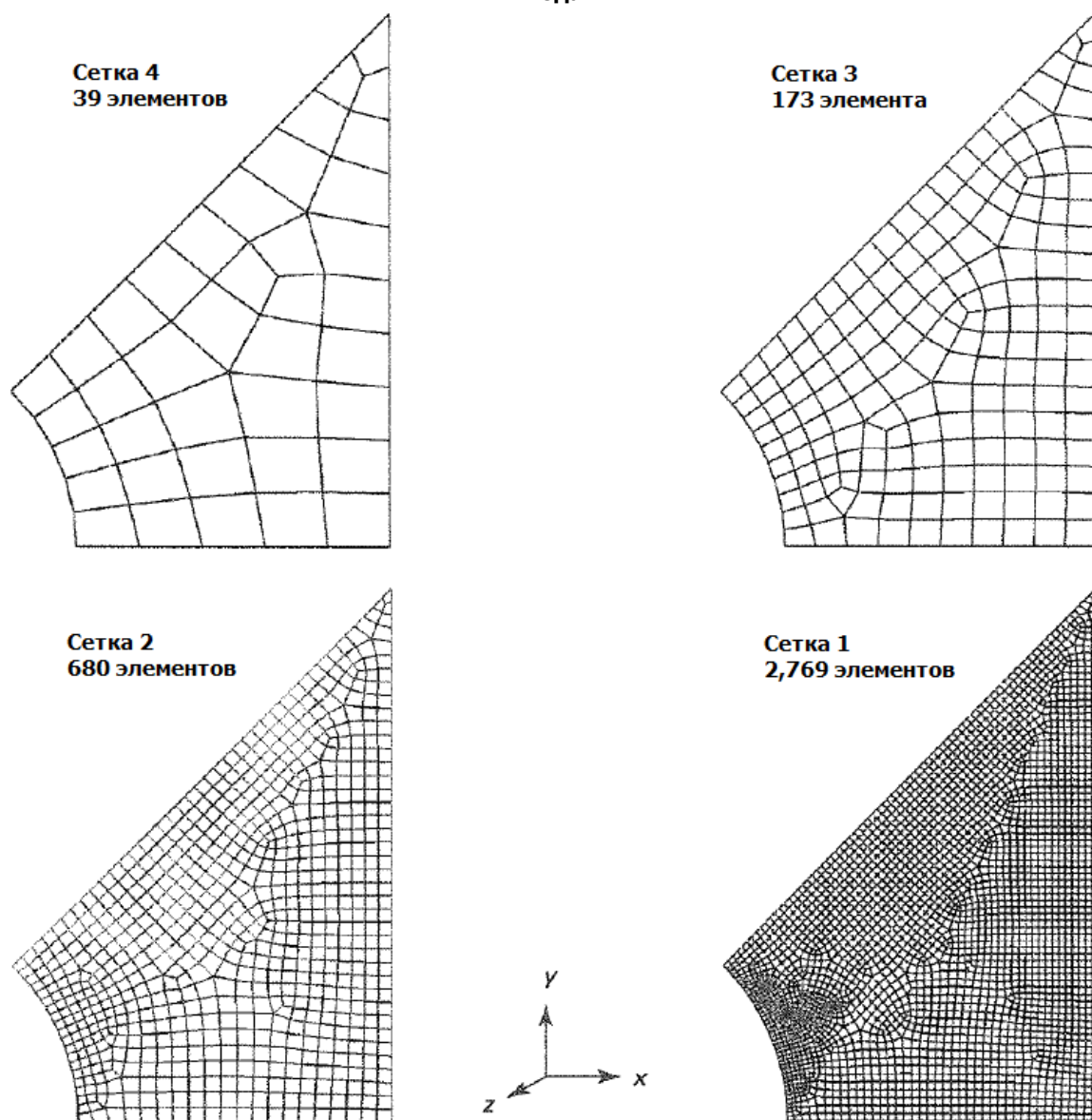
Конечных элементов компьютерный код настроен, чтобы решить описанную выше дифференциальное уравнение с добавлением перспективе источника на правой стороне. Код решает следующее дифференциальное уравнение

$$L(T) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] = Q(r, \theta) \quad (7-2-11)$$

с конвективных граничных условий.

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} &= q_n(r, \theta) \Big|_{s_1} = h_i (T|_{s_1} - T_f) \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} &= q_n(r, \theta) \Big|_{s_2} = h_o (T|_{s_2} - T_\infty) \end{aligned} \quad (7-2-12)$$

Рис. 7-2-2 Сетки конечных элементов, используемые в исследовании уточнения верификации кода



Код должен иметь функциональные возможности для применения пространственно изменяющуюся исходный термин, Q (г, фут), в дифференциальное уравнение. Функциональная форма исходного термина в поляр-

ных координатах дается в уравнении. (7-2-5). Конвективные граничные условия задаются с постоянными коэффициентами конвекции, h_i и h_o и температуры конвекции, рассчитанной по формулам. (7-2-10) и (7-2-8).

$$T_f(r, \theta)|_{s_1} = \frac{q_n(r, \theta)|_{s_1}}{h_i} + M(r, \theta)|_{s_1} = - \frac{K M(r, \theta)|_{s_1}}{h_i} + M(r, \theta)|_{s_1}$$

$$T_\infty(r, \theta)|_{s_2} = \frac{q_n(r, \theta)|_{s_2}}{h_o} + M(r, \theta)|_{s_2}$$

$$= - \frac{K M(r, \theta)|_{s_2}}{h_o} \left[\cos(\theta) + \frac{4}{7} \tan(4\theta) \sin(\theta) \right] + M(r, \theta)|_{s_2} \quad (7-2-13)$$

Поскольку код решает в декартовых координатах (x, y) , полярные координаты для вычисления исходных термин и температуры конвекционные рассчитываются из стандартных преобразований.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(y/x) \quad (7-2-14)$$

Дифференциальное уравнение определяется в уравнениях. (7-2-11) до (7-2-13) решается в коде на термического анализа [1]. Этот код, и большинство коммерческих кодов, использует итерационный метод (например, метод сопряженных градиентов), чтобы решить линейную систему уравнений. Допуск для итерационного метода должно быть установлено соответствующим для проверки исследования. Допуск должен быть установлен достаточно мало, так что погрешность аппроксимации в линейной системе меньше (от 2 до 3 заказов или величина; см. раздел 2), чем полученного путем сравнения решение Кодекса к аналитическим решением ошибки. Если проблема была нелинейной, допуск для нелинейного решения аналогичным образом должны быть соответствующим образом установлена. Допуск для линейного решения был установлен в 10^{-8} с использованием метода обобщенной минимальной остаточной (GMRES) в этих расчетах.

Четыре кодовых решения уравнений. (7-2-11) до (7-2-13) были получены с использованием значений параметров в таблице 7-2-1 и сетки, показанные на рис. 7-2-2. Проверка Код оценивает ошибку путем сравнения Решение Код к аналитическим решением в ур. (7-2-3). Проверка Код может быть выполнена для разных выходов кода. Когда проверка проводится в качестве прекурсора для проверки выход, используемый в деятельности проверки представляет первостепенный интерес. Другие выходы код также может быть изучен, и в целом должны быть изучены, когда это возможно, в код проверки деятельности. В качестве демонстрации, результаты проверки кода показаны для температуры на двух мест, интегрированной теплового потока вдоль поверхности S_1 (выходной, используемые в исследовании проверки администратором) и для L_2 нормы температурного поля.

Таблица 7-2-1 Значения параметров, используемых для примера верификации кода

Входной параметр	Значение
Теплопроводность ($k = K$)	5 Вт/м К
Коэффициент конвективной теплоотдачи, h_i	200 Вт/м ² К
Коэффициент конвективной теплоотдачи, h_o	10 Вт/м ² К

Проверка кода с использованием температуры в двух местах на поверхности S_j считается первым. Места рядом середине поверхности s , и имеют (x, y) координаты приведены ниже:

x y

Локация 1: 0,990131, 0,5044969

Локация 2: 1,056862, 0,3433951

Следует отметить, что последовательность сетка была определена иметь узел на обоих этих местах во всех четырех сеток. Если последовательность сетка не определен с узлом в этих местах, выходной код должен быть интерполированы от узловой раствора с получением раствора при заданных местах. Сравнение с аналитическим решением в этом случае будет включать сетки ошибку дискретизации и интерполяции ошибку. Как правило, предпочтительно, чтобы изучить ошибку дискретизации отдельно от ошибок интерполяции. Пока зависимость погрешности интерполяции на дискретизации является равной или высокого порядка, чем ошибки дискретизации сетки, две ошибки могут быть изучены одновременно. Тем не менее, только нижняя приказал ошибка будет наблюдаться в проверке кода.

Интегрированные выходы код также представляют интерес в проверки кода. В этом примере интегрированной тепловой поток вдоль поверхности u_l считается. Этот выход, используемый в примере проверки. Решения код в местной температуры и интегральной плотности теплового потока для четырех сеток приведены в таблице 7-2-2 с подробной информацией о счете элемента в сетках. Аналитические решения перечислены в нижней части таблицы 7-2-2. Аналитическое решение для температуры получается из ур. (7-2-3). Аналитическое решение интегрального потока получается интегрированием аналитическое выражение для нормального потока в ур. (7-2-8), а также поверхности s_1 .

Таблица 7-2-2 Результаты верификации кода

Решение	Общее количество элементов	Элементы вдоль s_1	Температура в Локации 1, °C	Температура в Локации 2, °C	Интегральный поток вдоль s_1 , Вт
Сетка 4	39	5	99.03772	100.96471	3.126 e-3
Сетка 3	173	10	99.05491	100.94549	6.123 e-4
Сетка 2	690	20	99.05954	100.94048	6.903 e-5
Сетка 1	2,769	40	99.06078	100.93926	1.571 e-5
Аналитическое	99.0611593	100.9388433	0.0

Ошибка в решении самого кода определяется как

$$E_h = f(h) - f^{\text{exact}} \quad (7-2-15)$$

где

f^{exact} = аналитическое решение

$f(h)$ = код решение для этой сетке

h = характерный размер сетки

Ошибка может быть оценена для выбранных выходов кода, как температура в отдельных местах или интегралов выходов. Нормы погрешности также представляют интерес, как теоретические доказательства зависимости ошибки по сетке, как правило, с точки зрения норм ошибки [2]. Например, норма L2 представляет собой интеграл от ошибки по области задачи (A ").

$$L_2^2 = \frac{1}{A_{\Omega}} \int_{\Omega} E_h^2 dA_{\Omega} \quad (7-2-16)$$

Другие меры ошибок H, полунормой, которая объединяет ошибку в градиента и L ^ норма, которая является максимальной ошибкой по области [2]. В качестве примера L2 норма температуры вычисляется в этом примере. Для оценки норму ошибка интегрирована по области. Гаусса-квадратурной был использован для расчета нормы L2 здесь. Другие численные приближения может быть использован, но ошибка аппроксимации в оценке интеграл должен быть относительно небольшим по сравнению с E_h .

Зависимость ошибки на характерным размером ячейки изучена. Характерный размер сетки в данном исследовании принимается за длиной ребра для средней площадью элемента (для этого двумерной задачи)

$$h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{elements}}} A_{\Omega_i}}{N_{\text{elements}}}} \quad (7-2-17)$$

где

A_{Ω_i} = площадь элемента i

Общая площадь области (A_i) является 3.16 м2 для домена на рис. 7-2-1. Другие характеристики сетки являются длина диагонали через элемент с максимальной площадью (объемом в 3-D) в сетке [2].

Ошибка в коде решений для локальных (точечных) температурах, интегрированный поток и L2 нормы приведены в таблице 7-2-3 в зависимости от сетки и характеристики размеров ячеек сита. Все три выхода кода демонстрируется сходимость к аналитическим решением. Ошибки уменьшаются монотонно Решение Код сходится к аналитическим решением. Абсолютное значение ошибки на графике как функцию характерным размером ячеек на фиг. 7-2-3. Ошибка (на логарифмической шкале) на рис. 7-2-3 демонстрирует примерно линейную зависимость от журнала (футов) для всех трех кодовых выходов рассмотренных. Как уже говорилось в разделе 2, для последовательных численных методов решения (как конечного элемента) на хорошо себя проблем, ошибка в решении асимптотически пропорциональна h^p , b

$$E_h = f(h) - f^{\text{exact}} = Ch^p + H.O.T \quad (7-2-18)$$

где

H.O.T = высшего порядка условия

В дополнение к проверке, что код сходящихся к правильному решению, код проверки проверяет скорость сходимости ошибки. Опорная линия (OF) представлена на рис. 7-2-3. Ошибка в температуре в местах 1 и 2 и нормы L2 визуалью параллельно опорной линии (OF) с указанием эти ошибки имеют зависимость второго порядка на размер сетки (фут). , Уменьшает на более высокой скорости, чем второго порядка ($p = 2$) интегральный поток.

Наблюдаемое порядок сходимости можно оценить из ошибки на любых двух сеток (см. пункт. 2-4.1)

$$p^{\text{obs}} = \frac{\ln \left(\frac{E_{h_2}}{E_{h_1}} \right)}{\ln(r_{21})} \quad (7-2-19)$$

где

$$E_{h_i} = E_h(h_i)$$

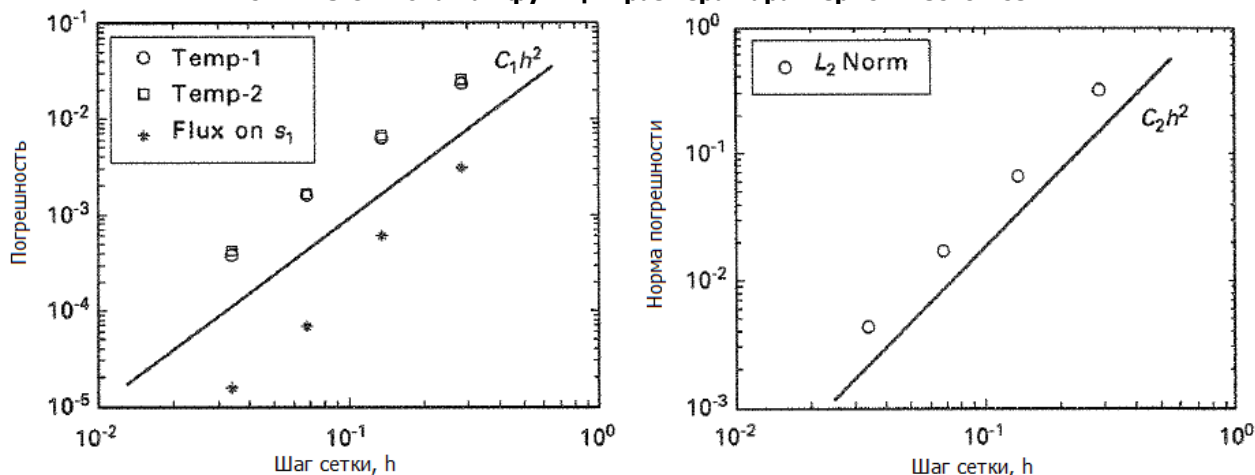
$$r_{21} = h_2/h_1 \text{ with } h_1 < h_2$$

Наблюдаемое порядок сходимости представлен в таблице 7-2-4. В таблице наблюдается порядок сходимости между последующими сеток от ур. (7-2-19) указана в первых трех рядах. Наиболее грубые сетки (сетка 4) не может быть в асимптотической области для локальной температуры; члены высшего порядка (Н.О.Т) в ур. (7-2-18) не может быть незначительным по сравнению с термином первого порядка. Конвергенция ставки, включающие сетки 4 немного меньше, чем 2, но увеличение до значений около 2, как сетка очищается. Скорость сходимости для интегрированного потока вдоль поверхности с, немного больше, чем 2 результатов от сеток 3 и 4 и сетки 1 и 2. Неясно, почему увеличивает скорость на более чем 3 для сеток 2 и 3. Ошибки настолько малы, для этого линейной задачи, что шум в наблюдаемом p может быть связано с ошибок округления.

Таблица 7-2-3 Ошибка (E_h) в моделировании кода в ходе уточнения сетки

Сетка	Размер характеристической сетки, h_i , м	Коэффициент уточнения, h_{i+1}/h_i	Ошибка температуры в Локации 1, °C	Ошибка температуры в Локации 2, °C	Ошибка интегрального потока вдоль s_1 , Вт	Ошибка нормальной температуры L_2 , °C
4	0.2847	...	-2.343 e-2	2.586 e-2	3.126 e-3	3.175 e-1
3	0.1352	2.11	-6.249 e-3	6.647 e-3	6.123 e-4	6.642 e-2
2	0.0677	2.00	-1.619 e-3	1.636 e-3	6.903 e-5	1.717 e-2
1	0.0338	2.00	-3.793 e-4	4.167 e-4	1.571 e-5	4.366 e-3

Рис. 7-2-3 Ошибка как функция размера характеристической сетки



С другой стороны, скорость сходимости для последовательности сеток можно оценить с помощью стандартного регрессии по наблюдаемой [журнал (W, журнала (£ ч)) данные. Коэффициенты C и p можно оценить из уравнения. (7-2-18) , пренебрегая более высокого порядка. Наблюдаемая скорость сходимости для четырех сеток с использованием регрессии по результатам всех четырех сеток указана в последней строке таблицы 7-2-4. наблюдаемый скорость сходимости примерно в два (второго порядка) для локальная температура и L2 температура нормой, когда оценивается по результатам с сетками 4 до 1.

Результаты проверки кода поддерживает, что компьютер код дает (по крайней мере) второй порядок точности в местной температуры, L2 нормы температуры и интегрального потока вдоль поверхности. Обратите внимание, что это относительно легкая задача. Даже для самой грубой дискретизации (сетка 4), код является очень точным. Численная ошибка в местах 1 и 2 меньше 0,026 °C (из 100 °C) и L2 норма ошибки меньше, чем 0,32 °C. В этом случае неструктурированной уточнения, фактор уточнение не является равномерным по области. Характерный размер каждого элемента в грубой сетки не является равномерно в два раза, когда элемент очищается производить последующую сетки. Однако численные конвергенции ошибка в монотонных и последовательных ставок образом и конвергенции на основе средней степени уточнения, кажется, не будут затронуты.

Результаты установили, что компьютерный код проверяется (по крайней мере) точности второго порядка в локальной температуры, L2 норма температуры и интегральный поток вдоль поверхности. Дополнительный шаг может быть сделан, чтобы подтвердить, что код сходится на наблюдаемой скорости и, что скорость является правильным. Дополнительный этап включает в себя сравнение наблюдаемого скорости сходимости к ожидаемому скорости сходимости, с целью которой является установить, что код не содержит кодирования ошибки (для функций кода протестированных в задаче проверки). Трудность в том, в определении ожидаемого скорости. При определенных условиях скорость сходимости для выбранных мер ошибках можно теоретически определяется. Например, скорости сходимости для различных норм ошибки с методом конечных элементов теоретически может быть получена [2]. Теоретические скорости сходимости, однако, выводятся для упрощенных случаях, как правило, линейных дифференциальных уравнений и для нормы на основе мер ошибках. В отсутствие теоретических скорости сходимости, является предметом субъективного суждения. На основе численных алгоритмов в коде может быть ожидание в течение порядка вывода кода. Если код верификации указывает наблюдаемое заказ меньше, чем ожидалось, то результаты должны быть доведены до разработчиков кода.

Таблица 7-2-4 Наблюдаемый порядок сходимости (P^{obs}) из уточнения сетки

Сетки	Температура в Локации 1	Температура в Локации 2	Интегральный поток на s_1	Норма температуры L_2
3 и 4	1.77	1.82	2.19	2.10
2 и 3	1.96	2.03	3.16	1.96
1 и 2	2.07	1.97	2.13	1.97
Все (1 по 4)	1.93	1.94	2.55	2.01

Для того чтобы результаты проверки кода, полученных в этом исследовании, L_2 норма температуры может быть теоретически показано, что второго порядка, и наблюдаемая скорость сходимости подтверждает, что точность второго порядка получается. Существует не известны теоретические основы для скорости сходимости местного температуры или интегрированной поверхностного теплового потока (для метода конечных элементов). Учитывая, что оба выхода продемонстрировать второй сходимости порядка, мало обеспокоенность тем, что код ошибки может быть ухудшения (порядок) точности кода. Если, однако, скорость сходимости локальной температуры был первый заказ, дальнейшее расследование может быть оправдано понять, почему был получен первый порядок сходимости. Пункт 2-3.3.3 обеспечивает дополнительную обсуждение возможных причин для ниже, чем ожидаемые темпы конвергенции.

7-3 Пример валидации

В этом разделе, процедура проверки представлены в этом документе демонстрируется через его применение к одной например проблемы. Пример предполагает количественного точность модели, чтобы предсказать скорость передачи тепла в плавник теплообменником. Каждый аспект процедуры валидации демонстрирует-ся. Шаги в порядке демонстрируются на примере данной статьи для

- (а) оценки неопределенности в экспериментальных данных
- (б) оценки неопределенности для численного ошибки в моделировании (проверка раствор)
- (в) оценки неопределенности в моделировании из-за неопределенности входного параметра
- (г) оценки неопределенности проверки
- (д) интерпретации сравнение проверки

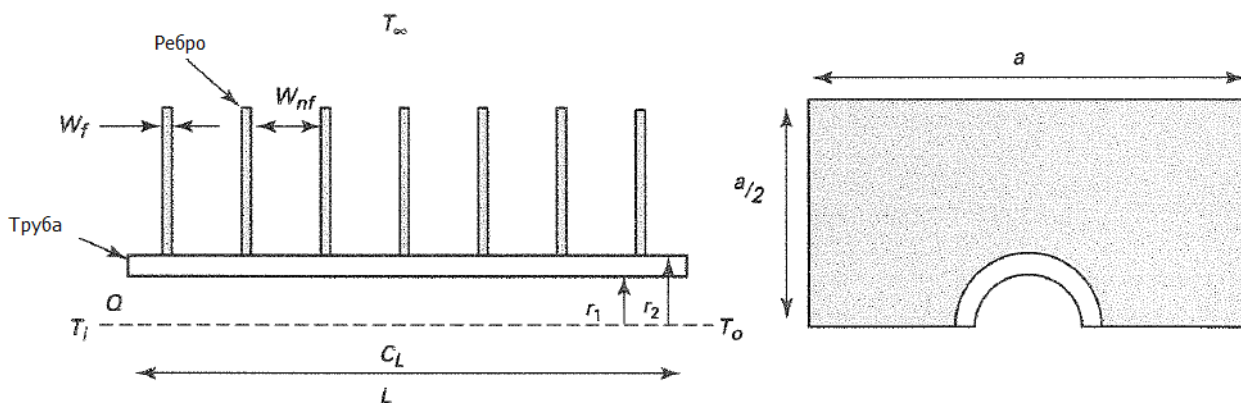
Правда проверка требует экспериментальных данных. Тем не менее, физические упражнения пример проверки, представленные здесь использует синтетические данные по уважительной причине. Процедура проверки представлен без двусмысленностей, дорого, описанных с контролируемые источники ошибок, а параметры можно манипулировать, чтобы выяснить поведение интерес.

В оставшейся части этого раздела представлен обзор примера проблемы. Экспериментальная конфигурация и измеренные экспериментальные данные для проверки модели описаны в пункте. 7-3.2. Неопределенность в экспериментальных данных также оценивается в этом разделе. Модель обсуждается в пункте. 7-3.3, в том числе последствий неопределенности в модельных входных параметров и проверки решения. Неопределенность и интерпретация сравнению проверки обсуждаются в пункте. 7-3.4. Оба Уравнение распространения и подходы Монте-Карло применяются для вычисления неопределенности проверки. Пункты 7-3.2 через 7-3.4 применить подход проверки этого документа от начала до конца на примере проблемы. В пункте. 7-3.5 оценка второго имитационной модели суммируется. Вторая модель была обновлена, чтобы включить дополнительную физику, что первая модель не включала. Обновление модели не считается частью подхода проверки. Однако, если поступления дополнительной информации и об изменениях в модели предлагается, процедура проверки может быть повторен для оценки обновленную модель.

7-3.1 Обзор проблемы валидации

Цель этого упражнения является оценка проверка имитационной модели для прогнозирования скорости передачи тепла от горизонтальной плавник теплообменником. Схематическое из плавника теплообменником сборки показан на рис. 7-3-1. Нагретая текучая среда циркулирует через трубы с прикрепленными ребрами. Тепло от жидкости обменивается с более холодный окружающий воздух, окружающий плавник теплообменником. Жидкость течет с расходом объем Q , входит с объемной температуры T_i и выходит на объемной температуры T_o , трубка имеет круглую геометрию, определяемую внутренним радиусом (r_i), внешним радиусом (R_2), и длина (L). Ребра имеют толщину W и равномерно разнесены вдоль длины теплообменника на расстоянии температура окружающего воздуха является постоянным по всей длине теплообменника со значением T_∞ . Плавники площадь в профиль с длиной стороны.

Рис. 7-3-1 Схема теплообменника с ребристыми трубками в сборе



Имитационная модель общей скорости теплопередачи по сравнению с экспериментальными данными в оценке валидации. Общий коэффициент теплопередачи моделируется с энергетического баланса на жидкости и требует численного решения уравнение в частных производных для линейного стационарного теплопроводности с конвективных граничных условий. Общий коэффициент теплопередачи в эксперименте рассчитывается из измерений скорости потока жидкости и сыпучих сред с температурой на входе и выходе через уравнения сжатия данных.

7-3.2 Экспериментальные данные

Экспериментальные данные основаны на ребро теплообменником с медной трубки и алюминиевых пластин с использованием нагретой воды в качестве рабочей жидкости. Синтетические экспериментальные данные генерируются на основании материалов, размеров и номинальных параметров, перечисленных в таблице 7-3-1. Процесс синтеза для получения экспериментальных данных представляет построения экспериментальной установки и проведении экспериментов.

Набор из 10 повторных экспериментов проводится на одном плавник теплообменником. В каждом эксперименте объемные температура жидкости на входе и выходе, объемный расход и температура окружающего воздуха измеряются. Температура окружающего воздуха, в то время как не нужно экспериментально вычислить общую скорость передачи тепла в эксперименте, необходимо смоделировать общую скорость передачи тепла с моделью. Важно, чтобы разработчик модели взаимодействия с экспериментатора чтобы гарантировать, что все условия, необходимые для моделирования эксперимента измерены (например, от температуры окружающей среды). Общий коэффициент теплопередачи в эксперименте может быть рассчитана как

$$q_D = \rho Q C_p (T_i - T_o) \quad (7-3-1)$$

где

C_p = удельная теплоемкость

Q = объемный расход

q_D = общий уровень теплоотдачи, Вт

$(T_i - T_o)$ = падение температуры основная жидкость вдоль теплообменника

ρ = плотность жидкости

Измеренные данные для набора 10 экспериментов и вычисленное общее интенсивности теплообмена в эксперименте, приведены в таблице 7-3-2. Среднее значение измерения в течение 10 опытов приведены в последней строке таблицы 7-3-2.

Таблица 7-3-1 Информация о ребристых трубках в сборе и условиях потока

Материал	Значение
Внутренняя жидкость	Вода
Материал трубок	Медь
Материал ребер	Алюминий
Внутренний радиус труб, r_1 , м	1.03e-2
Внешний радиус труб, r_2 , м	1.11e-2
Длины края ребер, a , м	5.40e-2
Толщина ребер, w_{nf} , м	2.54e-4
Шаг ребер, w_{nf} , м	4.8e-3
Количество ребер, N_f	500
Длина, L , м	2.54
Объемная скорость потока, Q (м ³ /с)	6.34e-6 (номинальное)
Температура жидкости на входе, T_i , °C	70 (номинальное)
Температура окружающей среды, T , °C	22 (номинальное)

Существует вариация в измерениях и общей скорости теплопередачи, полученного из 10 экспериментов в таблице 7-3-2. Эксперименты (синтетически) работают на том же плавник теплообменником. Таким образом, без изменений не происходит из-за изменений в теплообменнике материалов или геометрии. Изменение обусловлено

- (а) повторения условий эксперимента
- (б) случайная погрешность измерения

В 10 экспериментах было номинально идентичные условия потока. Тем не менее, вождение условия потока, температура на входе жидкости, объемный расход, и температура окружающей среды, реплицируются между экспериментами в точности, что они находятся под контролем и измеренных. Например, температура на входе было указано, что номинально 70 ° С. Истинная температура на входе в течение одного эксперимента может быть 70,1 ° С. Измеренная температура на входе 70,1 ° С плюс погрешность измерения. В приложениях проверки, где условия движения изменяются из-за отсутствия повторяемости эксперимента, это изменение можно объяснить с помощью измеренных условия вождения эксперимента в модели. Если условия эксперимента могут быть воспроизведены эффективно (то есть, те же самые условия движения для повторных экспериментов), эффект случайного вклад в погрешность измерений может быть уменьшено путем усреднения по несколько экспериментов.

Несколько измерения используются для вычисления общей скорости передачи тепла и все измерения имеют ассоциированную неопределенность. Оценки неопределенности для измерений могут быть получены из спецификациями завода-изготовителя или через калибровки устройства. Для физических свойств, таких как плотность и удельная теплоемкость воды, решение может потребоваться. С оценками неопределенности для случайных и систематических вносов в неопределенности измерений, неопределенность в общем интенсивности теплообмена можно оценить. Оценки экспериментальных стандартных неопределенностей представлены в таблице 7-3-3. Объемные температуры жидкости и объемный расход имеют случайные и систематические погрешности, связанные с измерениями. Датчики для измерения впускное отверстие масса жидкости и температуры на выходе были откалиброваны, чтобы обеспечить точность, перечисленные в таблице. Кроме того, калибровка была выполнена по тем же стандартам для входного и выходного сыпучих датчики температуры жидкости. По калибровки с таким же стандартом, систематических ошибок для впускных и выпускных температуры жидкости одинаковы (прекрасно коррелирует). В этом случае, ковариация систематической погрешности [то есть, ВЖК в уравнении распространения, показанной в уравнении. (7-3-2)], для впускных и выпускных сыпучих сред с температурой является продуктом систематических неопределенностей, б., Из двух измерений. Другие систематические ошибки не коррелируют, БТК = 0. Свойства воды берутся из базы данных [3] и, по оценкам, стандартные неопределенности 0,5% и 1% для плотности и теплоемкости. Погрешности размеров физическом оборудовании, считаются незначительным.

Таблица 7-3-2 Измеряемые условия потока и рассчитанная общая скорость теплопередачи

Эксперимент	ρ , кг/м ³	Q , м ³ /с	C_p , Дж/кг °С	T_i , °С	T_o , °С	T , °С	q_D , Вт
1	990	6.21 e-06	4,180	70.09	67.21	21.66	74.0
2	990	6.24 e-06	4,180	70.14	67.22	22.31	75.4
3	990	6.21 e-06	4,180	70.09	67.17	22.02	75.0
4	990	6.24 e-06	4,180	70.01	67.25	22.14	71.3
5	990	6.22 e-06	4,180	70.12	67.29	21.99	72.8
6	990	6.25 e-06	4,180	70.02	67.04	22.10	77.1
7	990	6.22 e-06	4,180	70.19	67.11	21.88	79.3
8	990	6.25 e-06	4,180	69.97	67.18	21.94	72.2
9	990	6.23 e-06	4,180	70.17	67.25	22.08	75.3
10	990	6.26 e-06	4,180	70.17	67.23	22.11	76.2
Среднее	990	6.23e-06	4,180	70.10	67.20	22.02	74.9

7-3.2.1 Экспериментальная Неопределенность, UD. Эффект неопределенности в значениях, используемых для расчета общей скорости передачи тепла от ур. (7-3-1) можно оценить с уравнением распространения. Подход к оценке экспериментальную неопределенность в общей интенсивности теплообмена в связи с неопределенностью в измерениях, используемых для расчета его представлена в разделе 4. Уравнение распространения систематических неопределенностей

$$b_{q_D}^2 = \sum_{i=1}^J \left(\frac{\partial q_D}{\partial X_i} b_i \right)^2 + \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{k=i+1}^J \frac{\partial q_D}{\partial X_i} \frac{\partial q_D}{\partial X_k} b_{ik} \quad (7-3-2)$$

где J = 5 это количество неопределенных величин в экспериментальной уравнения сжатия данных. Условия для независимых и взаимосвязанных систематических неопределенностей включены в ур. (7-3-2), потому что эксперимент коррелирует систематического ввода неопределенность в измеренных сыпучих сред с температурой.

Уравнение распространения для случайных неопределенностей

$$s_{q_D}^2 = \sum_{i=1}^J \left(\frac{\partial q_D}{\partial X_i} s_i \right)^2 \quad (7-3-3)$$

Уравнения распространения требуют

- (а) частные производные (коэффициенты чувствительности) от общей интенсивности теплообмена в отношении измерений, используемых для расчета его

(б) оценки случайных и систематических неопределенностей в этих измерениях

Как будет показано ниже в данном разделе, эффект случайной погрешности на общую скорость передачи тепла можно оценить непосредственно из 10 экспериментов.

Для простого уравнения сжатия данных в ур. (7-3-1), частные производные, необходимые в формулах. (7-3-2) и (7-3-3) аналитически получены (другие подходы для получения частных производных для более сложных случаях обсуждаются в разделе 3). В чувствительности общей скоростью передачи тепла к каждому из пяти входов, необходимых для расчета его в следующем.

$$\begin{aligned}\frac{\partial q_D}{\partial T_i} &= \rho Q C_p \\ \frac{\partial q_D}{\partial T_o} &= -\rho Q C_p \\ \frac{\partial q_D}{\partial Q} &= \rho C_p (T_i - T_o) \\ \frac{\partial q_D}{\partial \rho} &= Q C_p (T_i - T_o) \\ \frac{\partial q_D}{\partial C_p} &= \rho Q (T_i - T_o)\end{aligned}\quad (7-3-4)$$

Как уже говорилось в разделе 3, умножая частные производные от параметров, чтобы дать масштабных коэффициентов чувствительности полезно. Численные значения масштабных коэффициентов чувствительности приведены в таблице 7-3-4, и они были рассчитаны, используя усредненные замеров в течение 10 экспериментов (последней строке таблицы 7-3-2). Потому что частные производные зависят от величины измерений, величины частных производных будет варьироваться между экспериментов. Однако, учитывая небольшие различия в измерениях между экспериментами, величины частных производных для других экспериментов находятся в пределах 1% от значений (стоимость проекта со средними измерений), перечисленных в таблице 7-3-4.

Таблица 7-3-3 Оценки экспериментальных измерений стандартных неопределенностей

Переменная, X_i	Случайная, s_i	Систематическая, b_i
T_{ir} , °C	0.05°C	0.1°C
T_{or} , °C	0.05°C	0.1°C
Q , м ³ /с	0.5%	1.0%
ρ , кг/м ³	...	0.5%
C_p , Дж/кг °C	...	1.0%
T , °C	...	0.22°C

Таблица 7-3-4 Коэффициенты чувствительности для средних условий

X_i	$X_i \frac{\partial q_D}{\partial X_i}$	Стандартная неопределенность	
		Случайная, s_i	Систематическая, b_i
T_{ir}	1,808, Вт	0.07 %	0.14%
T_o	-1,734, Вт	0.07 %	0.14 %
Q	74.9, Вт	0.5 %	1.0%
ρ	74.9, Вт	...	0.5 %
C_p	74.9, Вт	...	1.0 %

Величины масштабных коэффициентов чувствительности можно сравнить, чтобы определить параметры, которые имеют наибольшее влияние на общую скорость передачи тепла. Вход и выход температура жидкости рассматриваются как параметров, которые оказывают самое масштабных коэффициентов чувствительности и, следовательно, будут иметь наибольшее влияние на общую скорость передачи тепла.

Неопределенность в общей скорости теплопередачи, полученной из эксперимента можно оценить с формулами. (7-3-2) и (7-3-3), используя частные производные и оценки неопределенности (повторные из таблицы 7-3-3) в таблице 7-3-4. [Следует отметить, что оценки неопределенностей представлены в относительных величин так, что распространение может быть легко оценена с масштабированных коэффициентов чувствительности. Хотя в целом не очень хорошая практика, чтобы обеспечить неопределенность в (неабсолютной) измерения температуры в относительном выражении, это делается здесь для удобства.]

Случайные и систематические неопределенности в общей скорости теплопередачи оценкам с уравнением распространения перечислены в последней строке таблицы 7-3-5. Случайная вклад в неопределенность измерения также можно оценить по 10 экспериментов непосредственно, вместо использования подхода распро-

странения. Случайная неопределенность оценивается как стандартное отклонение в общей скорости передачи тепла от 10 экспериментов. Случайное вклад оценивается по изменению между 10 экспериментах показано, вблизи середины таблицы 7-3-5. Оценивая случайный неопределенность непосредственно из нескольких экспериментов предполагает, что ошибка случайная измерения вызывает различия между экспериментами. Случайная неопределенность приблизительно от 10 экспериментах примерно на 30% больше, чем случайной погрешности оценить из уравнения распространения. Систематическая неопределенность можно оценить лишь с уравнением распространения.

Случайные и систематические вносы в неопределенности в общей интенсивности теплообмена, указаны отдельно в таблице 7-3-5.

Таблица 7-3-5 Экспериментальные значения общей скорости теплопередачи и ее стандартные неопределенности

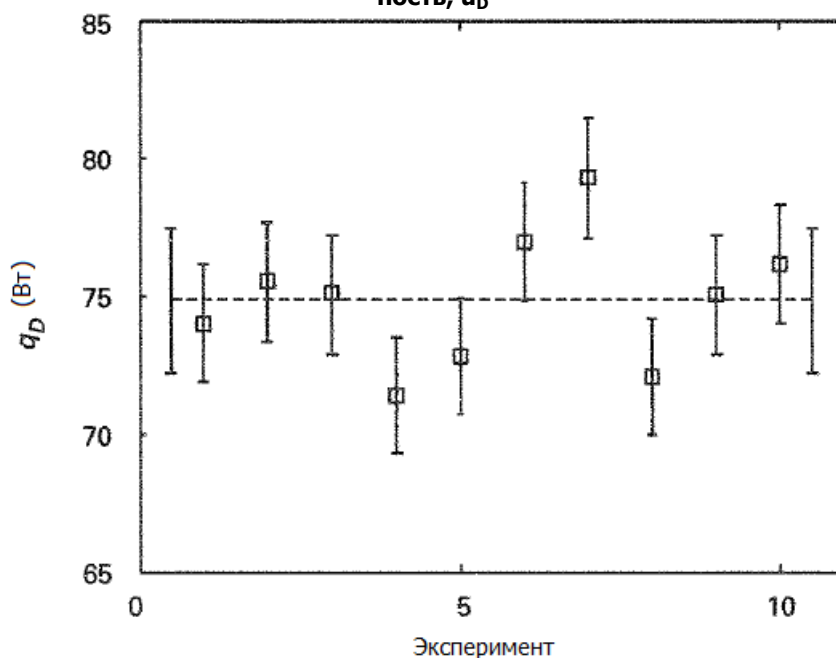
Эксперимент	q_D , Вт	s_{q_D} , Вт	b_{q_D} , Вт	$u_D = \sqrt{s_{q_D}^2 + b_{q_D}^2}$, Вт
1	74.0	2.39	1.15	2.65
2	75.6			
3	75.1			
4	71.4			
5	72.8			
6	77.0			
7	79.3			
8	72.1			
9	75.1			
10	76.2			
Среднее	74.9	1.84	1.15	2.17

Величины неопределенности основаны на использовании коэффициентов чувствительности оценены в среднем измерений над 10 экспериментов. Если коэффициенты чувствительности оцениваются на измеренных значений каждого эксперимента величины неопределенности изменить менее 1%. Общая неопределенность в установленной общей скорости теплопередачи является

$$u_D = \sqrt{s_{q_D}^2 + b_{q_D}^2} \quad (7-3-5)$$

Измеренная общая скорость теплопередачи со стандартными пределами неопределенности u_D приведены на рис. 7-3-2. Неопределенность в каждом эксперименте и в среднем из 10 экспериментов (прерывистая линия) и его неопределенности показано на рисунке. Стандартная неопределенность на экспериментально установленной общей скорости теплопередачи составляет примерно 3% и имеет больший вклад от случайных неопределенностей, чем от систематических неопределенностей. Дополнительный шаг может быть сделан, чтобы определить параметры, которые являются главными факторами, способствующими неопределенности в общей скорости теплопередачи, используя факторы важности. Факторы Важность обсуждаются в Необязательном приложении В.

Рис. 7-3-2 Экспериментальная общая скорость теплопередачи и ее стандартная неопределенность, u_D



7-3.3 Моделирование

7-3.3.1 Модель моделирования. Модель для имитации общую скорость передачи тепла от плавник теплообменником суммируется здесь. Информация о разработке модели приведены в обязательном приложении I. Модель общей теплоотдачи от плавник теплообменником является

$$q_s = \rho Q C_p (T_o - T_\infty) \left[\exp \left(\frac{\bar{U}_1 A_1}{\rho Q C_p} \right) - 1 \right] \quad (7-3-6)$$

где

A_1 = увлажненная площадь внутренней поверхности трубки ($A_1 = 2\pi r_1 L$)

C_p = удельная теплоемкость

Q = объемный расход

q_s = Общий уровень теплоотдачи, Вт

T_o = объемная температура жидкости на выходе

T = температура окружающего воздуха

\bar{U}_1 = аксиально усредненный общий коэффициент теплопередачи

ρ - плотность жидкости

Аксиально усредненный общий коэффициент теплопередачи вычисляется на основе коэффициентов теплоотдачи на ребристой (индексом e) и неребристой (индекс NF) части трубы

$$\bar{U}_1 = \frac{U_{f_i} w_f + U_{nf_i} w_{nf}}{w_f + w_{nf}} \quad (7-3-7)$$

Выражение для общих коэффициентов теплопередачи через неребристой области теплообменника

$$U_{nf_i} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_i} + \frac{r_1}{h_2 r_2}} \quad (7-3-8)$$

В ур. (7-3-8), h_1 и h_2 являются конвективные коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней го-лой трубе, соответственно, тыс. т является теплопроводность трубки, и r_1 и r_2 внутренний и внешний радиус трубки, соответственно. Коэффициент теплоотдачи на неребристой области (LFN / я) рассчитывается с тепло-выми свойствами и размерами коэффициентов трубных и конвекции на внутри и снаружи трубки. Коэффици-енты конвекторные оцениваются на основе эмпирических корреляций для потока в трубе и естественной кон-векции от горизонтального цилиндра.

Общий коэффициент теплопередачи для оребренной области (IPJ) рассчитывается путем решения для пе-редачи тепла через секции плавник теплообменником. Модель теплопередачи для оребренной области теп-лообменника показана на рис. 7-3 -3. Симметрия применяется таким образом, чтобы одна восьмая часть сече-ния моделируется. модель является трехмерным с одного элемента по толщине ребра и трубы.¹⁰ (¹⁰ Эквива-лент двумерная модель теплопередачи также может быть разработан для конфигурации.) дифференциальное уравнение в частных устойчивого теплопроводности численно решена по сечению.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{труба} \quad (7-3-9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{ребро}$$

Тепловые свойства и коэффициент конвекции постоянны. Идеальный контакт накладывается на стыке трубы и плавника

$$\begin{aligned} -k_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r_{2s}^-} &= -k_f \frac{\partial T_f}{\partial r} \Big|_{r_{2s}^+} \\ T_i(r_{2s}^-, \theta) &= T_f(r_{2s}^+, \theta) \end{aligned} \quad (7-3-10)$$

Граничные условия применяются на внутренней поверхности трубки и на внешней кромки ребра. Граница форма условие на внутренней поверхности трубки

$$-k_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r_1, \theta} = h_1 [T_\infty - T_i(r_1, \theta)] \quad (7-3-11)$$

где

r_1 = внутренний радиус трубы

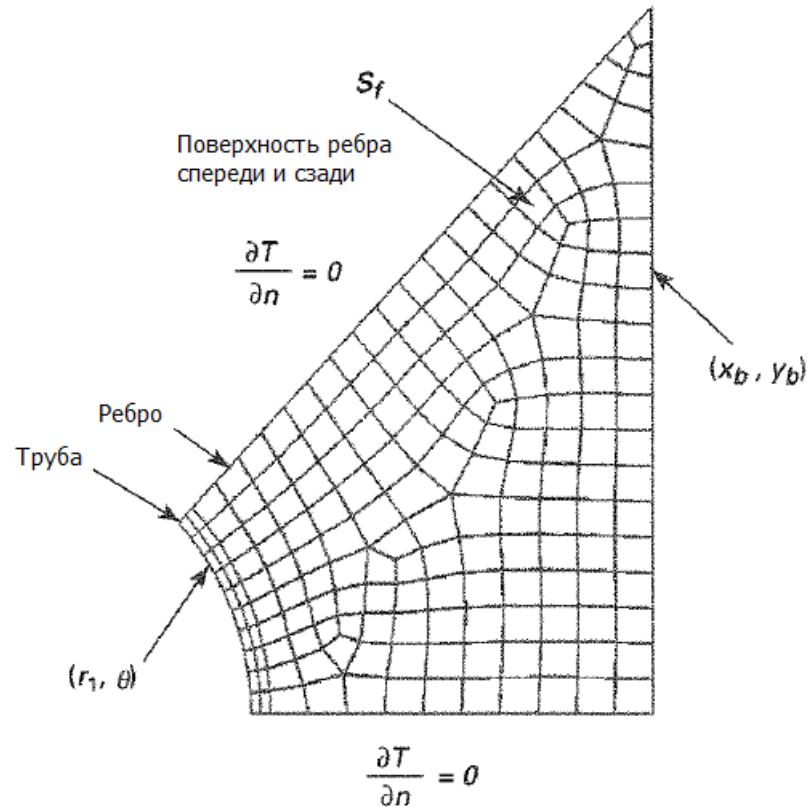
T_f = объемная температура жидкости

Θ = традиционная полярных координат для цилиндрической геометрии

Передняя и задняя поверхности плавника (s_f) имеют конвекцию в окружающем воздухе.

$$-k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \Big|_{s_f} = h_f (T_f|_{s_f} - T_\infty) \quad (7-3-12)$$

Рис. 7-3-3 Модель теплопередачи для ребристых трубок



Форма граничного условия на краю ребра

$$-k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \Big|_{(x_b, y_b)} = h_f [T_f(x_b, y_b) - T_\infty] \quad (7-3-13)$$

где

n = внешняя нормаль на этой поверхности

(x_b, y_b) = граничную поверхность плавника (плавник края напротив трубки)

Адиабатические условия применяются вдоль линий симметрии.

Тепловой поток на внутренней поверхности трубки интегрирован рассчитать общий коэффициент теплопередачи.

$$U_f = \frac{4}{\pi(T_f - T_\infty)} \int_0^{\pi/4} h_1 [T_f - T_f(r, \theta)] d\theta \quad (7-3-14)$$

Модель для имитации скорости передачи тепла требует 10 параметров для уравнений. (7-3-6) до (7-3-14). Ценности и стандартная неопределенность для параметров, используемых при моделировании, приведены в таблице 7-3-6, а все остальные параметры (связанные с геометрией) остаются неизменными, не неопределенности. Теплопроводности трубы и плавника взяты из значений базы данных для меди и алюминия [3]. Неопределенность (систематическое) в теплопроводности присваивается 5% стандартной неопределенности. Коэффициенты конвекторные оцениваются для условий внутреннего потока в трубе и для естественной конвекции от цилиндра и плавника. Коэффициенты конвекторные назначены на 10% стандартной неопределенности. Температура окружающей среды, температура жидкости (взято как температура масса впуска жидкости), и скорость потока измеряется в эксперименте (значения приведены в таблице 7-3-2). Неопределенности в этих параметров присваиваются от неопределенности измерений в таблице 7-3-3. Плотность и удельная теплоемкость воды взяты из значений базы данных. Те же значения и стандартные неопределенности для вычисления полной скорости передачи тепла в эксперименте применяются в модели. Неопределенности, назначенные в примере реалистичны, но не следует воспринимать как универсально применимой к другим ситуациям.

Таблица 7-3-6 Входные параметры и стандартные неопределенности модели моделирования

Параметр	Значение	Неопределенность (стандартная)	
		Случайная, s_i	Систематическая, b_i
k_t (Вт/м °C)	386	...	5%
k_f (Вт/м °C)	204	...	5%
h_1 (Вт/м ² °C)	150	...	10%
h_2 (Вт/м ² °C)	6	...	10%
h_f (Вт/м ² °C)	6	...	10%
T (°C)	Измеренное	...	1%
T_{fi} (°C)	Измеренное, T_i	0.05°C	0.1°C
Q (м ³ /с)	Измеренное	0.5%	1.0%
ρ (кг/м ³)	990	...	0.5%
C_p (Дж/кг °C)	4,180	...	1%

Значение моделирование на общую скорость передачи теплоты рассчитывается следующим образом. Передача двумерного тепла в разделе ребра-трубки, определяется по формулам. (7-3-9) до (7-3-13), решается, а общий коэффициент теплопередачи для оребренной области теплообменника, U_f , рассчитывается с ур. (7-3-14). Это решение будет сделано в конечном кода элемента, которые непосредственно вычисляет интеграл от потока в ур. (7-3 - 14). Общий коэффициент теплопередачи на неоребреной области теплообменника, рассчитывается с ур. (7-3-8). Общие коэффициенты теплопередачи используются в уравнении. (7-3-7) для расчета аксиально среднем Общий коэффициент теплопередачи и имитации значение общий коэффициент теплопередачи рассчитывается по формуле (7-3-6).

7-3.3.2 Результаты моделирования. Десять эксперименты проводились в этом проверки деятельности. Результаты моделирования может быть сгенерирован для каждого эксперимента, или представитель моделирование может быть сгенерирован для множества экспериментов. Решить, что результаты моделирования необходимы зависит от

- (а), что изменения в экспериментах и какое влияние изменение есть от модели
- (б), что осуществимо, учитывая вычислительная расход моделирования

Экспериментальная ситуация может меняться в зависимости от случайной ошибки измерения, изменения в движущих условиях эксперимента, и изменения в физическом оборудовании (например, экспериментов, проведенных на различных физических аппаратных средств). В этом примере существуют только первые два источника. В качестве демонстрации, два подхода рассматриваются для моделирования экспериментов. Во-первых, моделирование генерируется с использованием измерений от каждого эксперимента. Во-вторых, один моделирования генерируется с использованием среднего значения измерений от каждого эксперимента. Дополнительные комментарии приведены ниже в этом вопросе.

В экспериментальных применений, где иницирующий или дорожные условия изменяются из-за отсутствия воспроизводимости, но эти условия могут быть измерены, каждый эксперимент может быть смоделировано с использованием измеренных условий. Имитация каждого эксперимента на измеренных условиях выравнивает каждый моделирование с каждого эксперимента. Это не всегда может быть возможным, учитывая расходы вычисление или не могут быть необходимы. В некоторых случаях изменение движущих экспериментальных условиях может иметь незначительное влияние на моделировании. Чувствительность к условиям эксперимента можно изучать с помощью симуляции на ограничивающих значений экспериментальных условиях или с помощью анализа неопределенности.

Значения моделирования от общего интенсивности теплообмена перечислены во второй колонке таблицы 7-3-7 для индивидуально моделирования каждого эксперимента в свите экспериментов. Кроме того, моделирование с использованием среднее значение измеренного условий показано в последней строке. В этом случае отметить, что изменение между отдельными моделирования полной скорости теплопередачи мала, можно сделать вывод, что изменение в экспериментальных условиях, на вход модели имели небольшое влияние на моделировании.

Таблица 7-3-7 Значения моделирования общей скорости теплопередачи

Эксперимент	q_{sz} , Вт
1	97.9
2	96.7
3	97.2
4	96.8
5	97.3

6	96.9
7	97.7
8	97.1
9	97.2
10	97.2
Среднее	97.2

7-3.3.3 Верификация решения, u_{num} . Смоделированная общая скорость теплопередачи имеет зависимость от сетки, используемой в решении для передачи тепла в сечении ребра-трубки. Все расчеты были проведены с сетки, показанной на рис. 7-3 - 3. Сетка была вторая сетка из серии сеток, полученных для моделирования. Серия началась с грубой сеткой и примерно в два раза плотность сетки три раза в неструктурированной образцом, чтобы создать серию из четырех сетках. Серия сеток используется для оценки численной неопределенности в моделируемой скорости передачи тепла. Численная ошибка может быть оценены до выбора сетки имитировать эксперименты. Таким образом, сетка, необходимая для численной неопределенности, который был незначительным по сравнению с другими неопределенности (например, экспериментальной неопределенности или неопределенности входного параметра) может быть выбран. Если численная неопределенность должна быть сделана небольшая по отношению к неопределенности в связи с неопределенностью входного параметра, некоторая итерация может потребоваться, чтобы выбрать нужную сетку. Это потому, что сетка необходима для оценки неопределенности из-за неопределенности входного параметра.

Подход, описанный в п. 2-4 для проверки решения используется для оценки неопределенности для численной ошибки. Было проведено моделирование для серии сетки, что последовательно рафинированной в конечно-элементную сетку. Последовательность изысканный сетка в два раза плотность сетки в трубке и примерно в два раза плотность ячеек в плавника. Моделирование проводили для каждого из четырех сеток. Относительные характерный размер сетки в трубке и ребра и моделируемой скорости передачи тепла приведены в таблице 7-3-8. Средняя длина элемент край выбран в качестве характерного размера сетки. Эта сетка характеристика вдвое, как сетка уточняется в трубке и примерно в два раза в плавника. Характерный размер сетки для комплексной сборке плавник трубки находится в пределах округления характерного размера сетки для плавника.

Имитацию общей теплопроизводительность как сетка была уточнена представлена на рис. 7-3-4. Имитацию общей скорости теплопередачи был монотонную зависимость от характерного размера сетки. Процедура, описанная в пункте. 2-4.1 применяется для оценки числовой неопределенности. Процедура использует последовательность из трех сеток. Численная неопределенность оценивается с двух последовательностей трех сеток из четырех сеток. Во-первых, неопределенность оценивается с использованием последовательности сеток от Сетка 2 (хорошо), чтобы Сетка 4 (грубый). Тогда, оценки рассчитываются с использованием последовательности из Сетка 1 (штраф) для Сетка 3 (грубый). С помощью этих двух последовательностей постоянство скорости сходимости можно проверить.

Таблица 7-3-8 Результаты верификации решения для общей скорости теплопередачи

Сетка	h-трубки (относительная)	h-ребра (относительная)	q_{sr} Вт
1	0.125	0.119	97.89981
2	0.25	0.239	97.89765
3	0.5	0.477	97.88894
4	1	1	97.85440

Результаты проверки решения приведены в таблице 7-3-9. Порядок сходимости перечислены во второй колонке, представительные оценки погрешности перечислены в столбцах трех и четырех, и численной оценки неопределенности от конвергенции индексной сетки (GCI) указан в последнем столбце. Наблюдаемое порядок сходимости 2 для обеих последовательностей сетки. Относительные различия порядка 1 канал или меньше. GCI является порядок 10-3 и 1 канала для двух сетчатых последовательностей. С ур. (2-4-12), размерная оценка численной неопределенности, u_{num} , связана с безразмерной GCI как

$$u_{num} = \frac{GCI_{fine}^{21}}{2} q_s \quad (7-3-15)$$

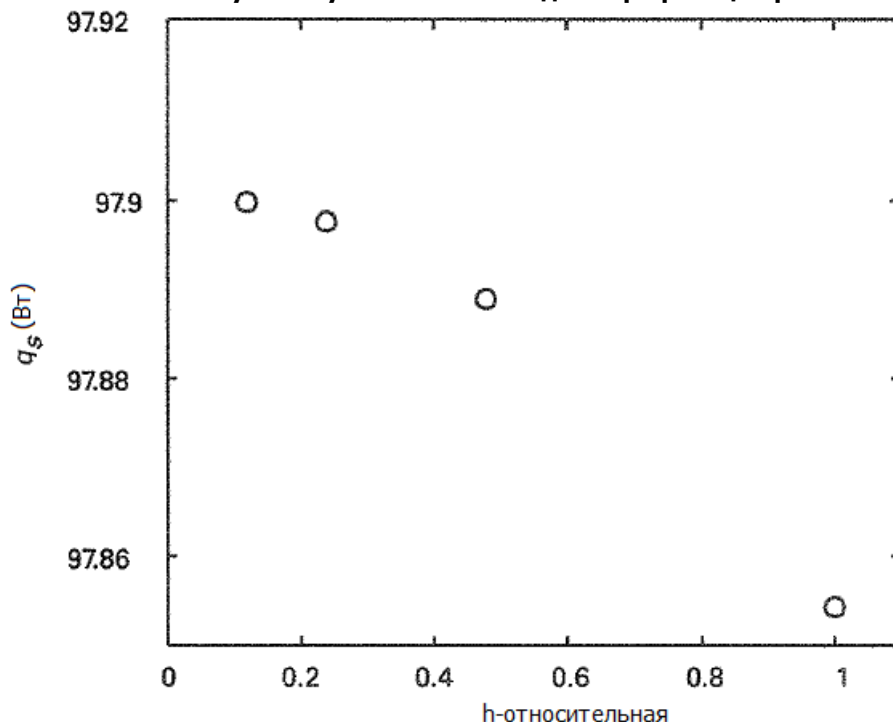
где размерные Q_S значение масштабирования = 97,2 Вт берется в качестве моделирования общей скорости передачи тепла на обычных условиях. Величина u_{num} приведена в последнем столбце таблицы 7-3-9.

Сетка 3 был использован для генерации результатов моделирования в предыдущем разделе. Численная оценка погрешности от первой последовательности сетки (в таблице 7-3-9) применяется для Сетка 3. Величина численной неопределенности можно утверждать, как незначительные, учитывая масштабы экспериментальной неопределенности. Численная неопределенность по порядку величины меньше экспериментальной неопределенности. Для полноты численное значение неопределенности входит в остальной части анализа.

7-3.3.4 Моделирование Ввод параметров Неопределенность, u_{num} . Параметры, необходимые для моделирования общей теплоотдачи имеют неопределенность в их значений. Оценки стандартной неопределенности в значениях параметров приведены в таблице 7-3-6. Оба случайные и систематические ошибки присутствуют. Эффект неопределенности в значениях, используемых для имитации общую скорость передачи тепла можно

оценить с уравнением распространения. Подход обсуждалось в разделе 3 применяется для оценки влияния неопределенности входного параметра.

Рис. 7-3-4 Изучение уточнения сетки для верификации решения



Уравнение распространения систематических неопределенностей

$$b_{q_s}^2 = \sum_{i=1}^I \left(\frac{\partial q_s}{\partial X_i} b_i \right)^2 \quad (7-3-16)$$

Уравнение распространения для случайных неопределенностей

$$s_{q_s}^2 = \sum_{i=1}^I \left(\frac{\partial q_s}{\partial X_i} s_i \right)^2 \quad (7-3-17)$$

Уравнение распространения требует частные производные общей имитированной интенсивности теплообмена по отношению к неопределенным параметрам. Эти частные производные вычисляются с центральной разностной аппроксимацией конечного второго порядка.

$$\frac{\partial q_s}{\partial X_i} = \frac{q_s(X_i + \delta X_i) - q_s(X_i - \delta X_i)}{2\delta X_i} \quad (7-3-18)$$

Моделирование выполняется в то время индивидуально возмущая каждый параметр, чтобы приблизить градиенты. Разница приближение центральный требует положительные и отрицательные возмущение в каждого параметра. Общее количество дополнительных необходимых для моделирования этом приближении в 2 раза количество параметров. С другой стороны, вперед или назад разница можно было бы использовать и требуется один-два раза меньше дополнительного моделирования. Преимущество центральной разностной аппроксимации является то, что

(а) это второе приближение порядка

(б) линейность моделирования (в пространстве параметров) может быть проверена

Хотя это не показано в документе, общая теплопередача была тесно сближены как линейна относительно параметров в пределах диапазона от стандартной неопределенности. Значения на номинала, вперед возмущения, и обратной возмущения были построены для каждого параметра, и наблюдалось соблюдение линейной зависимости в течение трех значений. Величина параметра возмущения была равна стандартной неопределенности в каждого параметра. Это дает приближение к частной производной в диапазоне от стандартной неопределенности. Если скорость теплопередачи близка к линейной, частная производная не зависит от параметра возмущений величины.

Частные производные (коэффициенты чувствительности), которые рассчитываются с помощью центральной разностной аппроксимации, приведены в таблице 7-3-10. Производные оцениваются с помощью средние измеренные входные условия (температура на входе, скорость, температура окружающей среды текут) за 10 экспериментов. Частные производные моделирования действительно изменяются с экспериментом, потому что входные переменные варьируются от экспериментов. Изменение входных переменных, что связано с измеренным данными, используемых в моделировании, не имеет существенного значения, и частные производные для средних измеренных условий представитель тех, для отдельных экспериментов. Если изменение в

моделировании отдельных экспериментов является значительным, частные производные, возможно, должны быть вычислена отдельно для моделирования каждого эксперимента.

Таблица 7-3-9 Меры численной ошибки и численной неопределенности для общей скорости теплопередачи

Порядок сеток	p (наблюдаемое)	$e_a^{21}, \%$	$e_{ext}^{21}, \%$	$GCI_{fine}^{21}, \%$	$u_{num}, \text{Вт}$
Сетка 2 по Сетка 4	1.99	3.530 e-4	4.718 e-4	1.416 e-3	0.07
Сетка 1 по Сетка 3	2.01	8.898 e-5	1.183 e-4	3.550 e-4	0.02

Таблица 7-3-10 Частные производные для общей скорости теплопередачи для имитационной модели с учетом неопределенных входных данных модели для средних измеренных экспериментальных условий и стандартная неопределенность для входных данных

x_i	$x_i \frac{\partial q_s}{\partial x_i}, \text{Вт}$	Неопределенность (стандартная)	
		Случайная, s_i	Систематическая, b_i
k_f (Вт/м °C)	0.015	...	5%
k_r (Вт/м °C)	0.19	...	5%
h_1 (Вт/м² °C)	48.21	...	10%
h_2 (Вт/м² °C)	41.16	...	10%
h_f (Вт/м² °C)	3.77	...	10%
T (°C)	-44.53	...	1%
T_{fl} (°C)	141.72	0.07 %	0.14%
Q (м³/с)	3.91	0.5%	1.0%
p (кг/м³)	3.91	...	0.5%
C_p (Дж/кг °C)	3.91	...	1%

Стандартная неопределенность в параметрах для моделирования распространяется по имитационной модели с уравнениями. (7-3-16) и (7-3-17), используя частные производные и неопределенность входных параметров в таблице 7-3-10. (Заметим, что эти стандартные неопределенности такие же, как значений, перечисленных в Таблице 7-3-6 и повторных здесь для удобства.) Случайный вклад в неопределенность может быть оценена путем распространения с помощью модели или в том случае, моделирование вычисляется для каждого эксперимента по оценке стандартное отклонение среди 10 экспериментов, обсуждался неопределенностью в экспериментальном пункте. 7-3.2.1.

Величины случайных и систематических стандартных неопределенности в моделировании общей скорости теплопередачи, перечислены в нижней части таблицы 7-3-11 от подхода распространения. Если один моделирование по среднему условий и его неопределенности из-за неопределенных входов были оценены значения в нижней части таблицы будут получены. Если, однако, моделирование были получены для каждого эксперимента случайным образом вклад в неопределенность может быть оценена из неопределенности в 10 моделирования. Случайная неопределенность перечислены для отдельных экспериментов стандартное отклонение между моделируемой общей теплоотдачи из 10 экспериментов.

Эффект случайной неопределенности относительно мала по сравнению с систематической неопределенности. Неопределенность в связи с смоделировать входной неопределенность вычисляется через случайные и систематические взносы.

$$u_{input} = \sqrt{s_{q_s}^2 + b_{q_s}^2} \quad (7-3-19)$$

Моделирование общей скорости передачи тепла и неопределенности в моделировании из-за модели неопределенности входных потоков показана на рис. 7-3-5. Неопределенность в моделировании каждого эксперимента и неопределенности в моделировании с использованием средних входы от 10 экспериментов (пунктирная линия) и ее неопределенность показаны.

Стандартная неопределенность в общем интенсивности теплообмена в связи с неопределенностью входного параметра составляет около 6,6%. Вклад каждого параметра с неопределенностью в симуляции могут быть идентифицированы с факторами важности. Важность факторы обсуждаются в Необязательные Приложение В. Факторы Важность показывают, что коэффициенты конвекционные на внутренней поверхности трубки (FT_i) и наружной поверхностью (h_2) счета 99% моделируемой систематической неопределенности в общую скорость теплопередачи. Коэффициент конвекции на внутренней поверхности составляет около 57%, а коэффициент на внешней поверхности составляет около 42%.

7-3.4 Оценивая проверки Сравнение

На данный момент в анализе, величины разницы между моделирования и экспериментальных измерений известны

$$E = S - D = q_s - q_D \quad (7-3-20)$$

Неопределенность проверки u_{val} является оценкой стандартного отклонения родительской популяции комбинации всех ошибок, кроме ошибки моделирования в стандартных компонентах S и D. неопределенности U_{num} , g_m и $(/)$ и UD , что в совокупности дают u_{val} были оценены. Если неопределенности в эксперименте и моделирования фактически независимы, то объединения неопределенностей прост.

$$u_{val} = \sqrt{u_D^2 + u_{input}^2 + u_{num}^2} \quad (7-3-21)$$

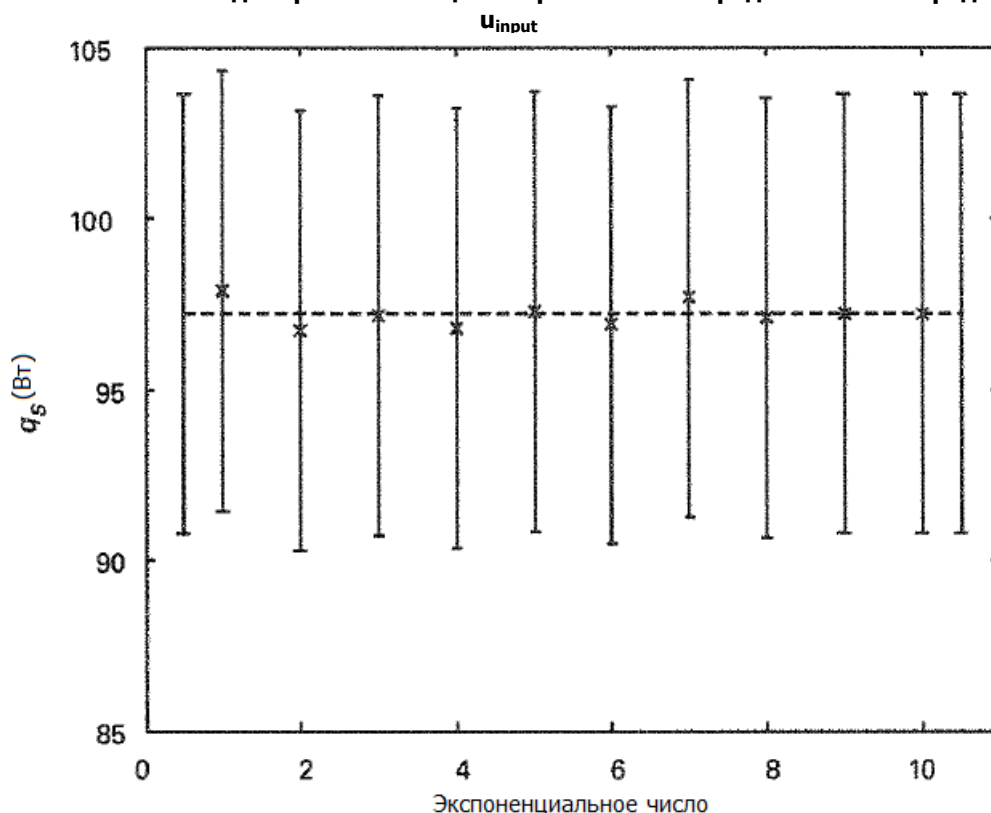
Тем не менее, в этом примере неопределенности в эксперименте и моделирования не являются независимыми. Причина того, что неопределенность не являются независимыми обсуждается в следующем разделе, где подход к вычислительных u_{val} представлена.

7-3.4.1 Подход передачи к оценке проверки неопределенности, u_{val} . Моделирование и экспериментальные неопределенности не являются независимыми, так как параметры являются общими для моделирования и эксперимента.

Таблица 7-3-11 Значения моделирования общей скорости теплопередачи и ее стандартная неопределенность из неопределенности входных параметров

Эксперимент	q_{Sr} , Вт	Неопределенность (стандартная)		
		s_{qSr} , Вт	b_{qSr} , Вт	u_{inputr} , Вт
1	97.9	0.37	6.37	6.38
2	96.7			
3	97.2			
4	96.8			
5	97.3			
6	96.9			
7	97.7			
8	97.1			
9	97.2			
10	97.2			
Среднее	97.2	0.10	6.37	6.37

Рис. 7-3-5 Значения моделирования общей скорости теплопередачи и ее неопределенности,



Это означает, что моделирование и эксперимент для источника идентичны по ошибкам. Неопределенные экспериментальные переменные (Таблица 7-3-3) и неопределенные входные моделирования переменных (таблица 7-3-6) содержат несколько общих неопределенных переменных. Все неопределенные параметры, которые влияют на разность $E = SD$ перечислены в таблице 7-3-12. Во второй колонке указывает влияет ли параметр (неопределенным) моделирование (S), эксперимент (D), или оба (D и S). Неопределенные парамет-

ры, которые влияют оба температура на входе основная жидкость, объемный расход, плотность жидкости, и теплоемкость жидкости. Для случаев с общей долевого источника идентичны ошибке, уравнения распространения для неопределенности моделирования и экспериментальные неопределенности должны быть объединены, чтобы рассчитать UML. Этот пример Случай 3 в разделе 5 и общего выражения для вычисления UML дается в пункте. 5-3.2.1.

$$\begin{aligned}
 u_{\text{val}}^2 = & \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho} \right) \right]^2 u_{\rho}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial Q} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial Q} \right) \right]^2 u_Q^2 \\
 & + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial C_p} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial C_p} \right) \right]^2 u_{C_p}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right]^2 u_{T_i}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{\infty}} \right)^2 u_{T_{\infty}}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial \mu} \right) u_{\mu}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_1} \right) u_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_2} \right)^2 u_{h_2}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_f} \right)^2 u_{h_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_c} \right)^2 u_{h_c}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_f} \right)^2 u_{k_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial d_1} \right)^2 u_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial d_2} \right)^2 u_{d_2}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial L} \right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial a} \right)^2 u_a^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial W_j} \right)^2 u_{W_j}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial W_{\text{eff}}} \right)^2 u_{W_{\text{eff}}}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right)^2 u_{T_{o,D}}^2 + u_{\text{num}}^2 \\
 & + 2 \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right] \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{o,D}} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right) \right] b_{T_i} b_{T_{o,D}}
 \end{aligned} \tag{7-3-22}$$

Общее выражение была упрощена для этого примера. Контактная проводимость (HC) и вязкость (PT) не включены в моделировании. Кроме того, неопределенности, связанные с геометрией (DV d2, L, A, W "и WNF) пренебрегают. После удаления термины, связанные с этими параметрами, ур. (7-3-22) можно упростить.

$$\begin{aligned}
 u_{\text{val}}^2 = & \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho} \right) \right]^2 u_{\rho}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial Q} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial Q} \right) \right]^2 u_Q^2 \\
 & + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial C_p} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial C_p} \right) \right]^2 u_{C_p}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right]^2 u_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{\infty}} \right)^2 u_{T_{\infty}}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_1} \right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_2} \right)^2 u_{h_2}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_f} \right)^2 u_{h_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_f} \right)^2 u_{k_f}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right)^2 u_{T_{o,D}}^2 + u_{\text{num}}^2 \\
 & + 2 \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right] \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{o,D}} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right) \right] b_{T_i} b_{T_{o,D}}
 \end{aligned} \tag{7-3-23}$$

Есть несколько известных вопросы, касающиеся ур. (7-3-23). Первые четыре члена и последний член в уравнении. (7-3-23) представляют собой вклад от неопределенных параметров, оказывающих воздействие как моделирования и экспериментальные значения общего коэффициента теплопередачи. Вклад этих параметров uval зависит от разницы в частных производных от моделирования и эксперимента (в квадрате). Неопределенные параметры, которые только влияют на моделирование включены в перспективе пяти до десяти. Четвертая строка имеет срок для неопределенного параметра, влияет на эксперимент и численное неопределенности. Окончательный член уравнения учитывает коррелированных ошибок смещения между температурами входа и выхода жидкости, которые влияют как моделирование и эксперимент.

Таблица 7-3-12 Параметры, включенные в оценку uval, оценки параметра стандартной не-

определенности и коэффициенты параметра чувствительности

Параметр	Воздействие	Неопределенность (стандартная)			Масштабные коэффициенты чувствительности	
		Случайная, s_i	Систематическая, b_i	Общая, u_i	$\chi_i \frac{\partial q_D}{\partial \chi_i}$, Вт	$\chi_i \frac{\partial q_S}{\partial \chi_i}$, Вт
T_i (°C)	D и S	0.07%	0.14%	0.16%	1808	141.72
T_o (°C)	D	0.07%	0.14%	0.16%	-1734	...
Q (м³/с)	D и S	0.5%	1.0%	1.12%	74.9	3.91
ρ (кг/м³)	D и S	...	0.5%	0.5%	74.9	3.91
C_p (Дж/кг °C)	D и S	...	1.0%	1.0%	74.9	3.91
k_t (Вт/м °C)	S	...	5%	5%	...	0.015
k_f (Вт/м °C)	S	...	5%	5%	...	0.19
h_1 (Вт/м² °C)	S	...	10%	10%	...	48.21
h_2 (Вт/м² °C)	S	...	10%	10%	...	41.16
h_f (Вт/м² °C)	S	...	10%	10%	...	3.77
T_∞ (°C)	S	...	1%	1%	...	-44.53

Неопределенности параметров и коэффициенты чувствительности параметр (из таблицы 7-3-4 и Таблица 7-3-10) для моделирования и эксперимента, которые необходимы для оценки MBA | приведены в таблице 7-3-12. (Заметим, что относительные неопределенности следует использовать с масштабированными коэффициентами чувствительности.)

Результаты, приведенные в таблице 7-3-13 суммировать общее передачу тепла от эксперимента и его неопределенность, результат моделирования и его неопределенность из входного неопределенности и числовой неопределенности, ошибка сравнении, и неопределенность проверки MVAL из уравнения. (7-3-23). Одно значение УФ> 1 вычисляется и не зависит от того, каждый эксперимент моделируется или среднее эксперимент моделируется. В обоих случаях коэффициенты чувствительности оценивали по среднему условиям 10 экспериментов.

В этом примере, хотя моделирование и эксперимент поделились источники ошибок, величина u_{val} пренебрежимо отличаются от значений, полученных из предполагая независимость и используя ур. (7-3-21). Этот результат зависит от

(а) величина разницы в масштабных коэффициентов чувствительности в моделировании и эксперимента для общих параметров

(б) относительная важность общих параметров неопределенности в моделировании и эксперименте

Этот результат является проблема конкретных и другие проблемы могут иметь больший разницу.

7-3.4.2 Монте-Карло подход к оценке проверки неопределенности, u_{val} . Неопределенность проверки также могут быть вычислены с подхода Монте-Карло. В этом примере, моделирование и эксперимент имеют одинаковые источники ошибок и коррелируют ошибки (в входе и выходе температуры жидкости). Это тот же случай 3 в разделе 5, а также порядок оценки u_{val} по Монте-Карло обсуждается в пункте. 5-3.2.2.

Таблица 7-3-13 Экспериментальные значения и значения моделирования общей скорости теплопередачи и связанные стандартные неопределенности

Эксперимент	q_{Dr} Вт	u_{Dr} Вт	q_{Sr} Вт	u_{inputr} Вт	u_{numr} Вт	E_r Вт	u_{valr} Вт
1	74.0	2.65	97.9	6.38	0.07	23.9	6.69
2	75.6		96.7			21.1	
3	75.1		97.2			22.1	
4	71.4		96.8			25.4	
5	72.8		97.3			24.5	
6	77.0		96.9			19.9	
7	79.3		97.7			18.4	
8	72.1		97.1			25.0	
9	75.1		97.2			22.1	
10	76.2		97.2			22.3	
Среднее	74.9	2.17	97.2	6.37	0.07	22.3	6.69

Процедура Монте-Карло включает отбор проб над диапазоне неопределенными параметрами, которые вклад в моделировании и экспериментальных уравнения сжатия данных. Модель моделирование и экспериментальное уравнение обработки данных оцениваются с образцами параметров для оценки влияния неопределенности параметров. Процедура отбора Латинской гиперкуб (LHS) применяется в данном разделе, чтобы оценить u_{val} . Процедура LHS обсуждается в разделе 3 применительно к имитационной модели для и в разделе 4 для экспериментального неопределенности, UD. Поскольку моделирование и эксперимент поделились источники ошибок, выборка параметров в экспериментальной уравнения и параметров для моделирования сжатия данных делается совместно оценить u_{val} . В тех случаях, которые не разделяют источники ошибок, выборка Монте-Карло может быть сделано независимо от моделирования и экспериментального уравнения

сжатия данных.

Все параметры, необходимые для расчета общей скорости передачи тепла в эксперименте и моделирования и их стандартные неопределенности перечислены Таблица 7-3-14. При применении процедуры отбора образцов, на основе, в дополнение к указанию стандартную неопределенность каждого параметра, (вероятность) функция распределения требуется для каждого параметра. Например, неопределенность в параметре может быть распределена в виде гауссовой функции, определенной среднее и стандартное отклонение. В большинстве случаев нет достаточных данных, чтобы назначить функцию распределения и является предметом субъективного суждения. Для этого примера демонстрационного гауссова функция распределения назначается ко всем входам. Среднее значение распределения Гаусса берется в качестве номинального значения параметра (в среднем за 10 экспериментов для измеряемых входов), а стандартное отклонение является стандартная неопределенность; эти значения приведены в таблице 7-3-14.

Двадцать LHS образцы входов генерируются для примера. Два из комплектов образцов параметр LHS (из 20), перечислены в последних двух столбцах таблицы 7-3-14. Моделирование и экспериментальные значения общего коэффициента теплопередачи, и их разность, по каждому из 20 комплектов образцов параметр LHS приведено в таблице 7-3-15. Образцы LHS общей интенсивности теплообмена также приведены на рис. 7-3-6. Образцы общей интенсивности теплообмена анализируются со стандартными статистики, чтобы получить неопределенность из образцов LHS. Среднее значение и стандартное отклонение перечислены в нижней части таблицы для каждого столбца. Средствами являются номинальная (ожидаемое значение) из моделируемых (QS) общей скорости теплопередачи, экспериментальные (QS) общей скорости теплопередачи, и разницы (E). Сметные стандартных отклонения (из графы 3, 4 и 5) являются стандартными неопределенности в моделировании из-за параметра неопределенности входного (winput), экспериментальной неопределенности из-за неопределенности измерений (UD), и вклад этих двух этих неопределенностей УФА |.

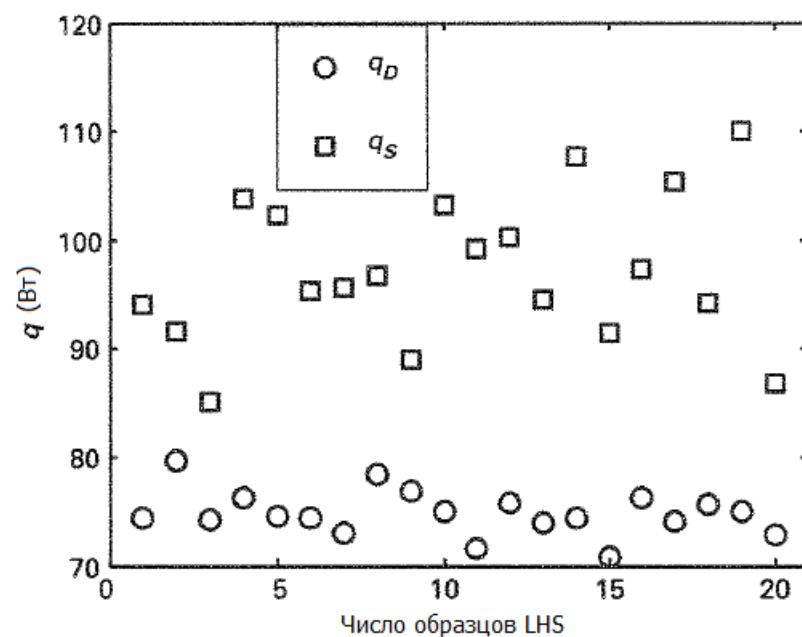
Номинальные значения QS и КТ и их стандартных оценок неопределенности, вычисленных с подходом LHS может быть по сравнению с предыдущими оценками из подхода распространения (в пп. 7-3.2.1 и 7-3.3.4). Фундаментальное различие между левой и подходов распространения является предположение о линейности в подходе распространения, которая не является необходимым в подходе LHS. Некоторое представление о влиянии этого предположения может быть получена через сравнения результатов двух подходов. Это сравнение не только в связи с вступлением в линейности, потому что подход LHS имеет зависимость от размера выборки. Сравнение показано в таблице 7-3-16. Обратите внимание, что в примере Mnum является незначительной величины и uval только имеет вклады от входного моделирования неопределенности и экспериментальной неопределенности измерений.

Результаты в таблице 7-3-16 показывают, что LHS и распространения подхода дают устойчивые результаты для номинальных суммарным показателям теплопередачи и неопределенностей. Значения для эксперимента должно быть согласовано дозы, потому что экспериментальная уравнение обработки данных является линейной функцией параметров [см. уравнение. (7-3-1)]. Разница между значениями из LHS подход и распространения уравнения небольшой и только в связи с зависимостью размера выборки для LHS.

Таблица 7-3-14 Стандартная неопределенность параметра и примерные образцы латинского гиперкуба

Параметр	Воздействие	Номинальное	Неопределенность (стандартная)			Образцы латинского гиперкуба	
			Случайная, s_i	Систематическая, b_i	Общая, u_i	1	2
T_i (°C)	D и S	70.01	0.07%	0.14%	0.16%	70.183	70.116
T_o (°C)	D	67.20	0.07%	0.14%	0.16%	67.288	67.072
Q (м ³ /с)	D и S	6.23 e-06	0.5%	1.0%	1.12%	6.334 e-06	6.265 e-06
ρ (кг/м ³)	D и S	990	...	0.5%	0.5%	984.5	992.0
C_p (Дж/кг °C)	D и S	4180	...	1.0%	1.0%	4118	4211
k_t (Вт/м °C)	S	386	...	5%	5%	391.1	388.9
k_f (Вт/м °C)	S	204	...	5%	5%	239.7	215.9
h_1 (Вт/м ² °C)	S	150	...	10%	10%	140.8	160.7
h_2 (Вт/м ² °C)	S	6	...	10%	10%	7.008	4.760
h_f (Вт/м ² °C)	S	6	...	10%	10%	6.732	5.886
T_∞ (°C)	S	22.02	...	1%	1%	22.02	22.19

Рис. 7-3-6 Образцы LHS моделируемых и экспериментальных значений общей скорости теплопередачи



Моделирование имеет приблизительно линейную зависимость от параметров. Эти два подхода дают одинаковую номинальную стоимость от общего интенсивности теплообмена, но оценка стандартной неопределенности больше (6,6%) для LHS, чем для подхода распространения. Оценки неопределенности валидации для двух подходов же последовательны в номинальной стоимости разницы в общей скорости теплопередачи, с LHS оценки большей стандартную неопределенность, чем предлагаемая распространения. Согласованность между левой и распространения приближается адреса опасения, что могут возникнуть в применимости линейной предположении, необходимого для подхода распространения. Соглашение между двумя подходами проблема конкретных, и другие проблемы могут продемонстрировать большую разницу.

Таблица 7-3-15 LHS образцы моделируемых и экспериментальных значений общей скорости теплопередачи

Номер образца	q_S , Вт	q_D , Вт	$E = q_S - q_D$, Вт
1	94.08	74.33	19.74
2	91.58	79.66	11.92
3	85.06	74.25	10.81
4	103.84	76.34	27.51
5	102.25	74.50	27.75
6	95.33	74.49	20.84
7	95.60	73.09	22.51
8	96.73	78.49	18.24
9	89.02	76.84	12.18
10	103.17	75.00	28.16
11	99.16	71.57	27.59
12	100.27	75.84	24.43
13	94.46	73.90	20.56
14	107.69	74.39	33.30
15	91.49	70.91	20.58
16	97.33	76.24	21.09
17	105.41	74.12	31.28
18	94.27	75.66	18.61
19	109.94	75.09	34.85
20	86.83	72.79	14.04
Среднее	97.18	74.88	22.03
Стандартное отклонение	6.79	2.08	7.03

7-3.4.3 Интерпретация Результаты проверки. В предыдущих разделах были представлены подход для определения ошибок сравнение E и неопределенности проверки и (Экспериментальная неопределенности и неопределенности моделирования в связи с неопределенностью входного параметра и численного неопределенности также были оценены.) Неопределенность проверки увал является оценкой стандартного отклонения родитель население комбинации ошибок (SNUM + Staput - SD), где δ_{model} была исключена. Выражение для Smodel, ошибки из-за допущений моделирования и приближений, была получена в разделе 1.

$$\delta_{model} = E - (\delta_{num} + \delta_{input} - \delta_D) \quad (7-3-24)$$

Таким образом, $E \pm u$ и. определяет интервал, в течение которого S , падает с неопределенным вероятности, или

$$E - u_{val} \leq \delta_{model} \leq E + u_{val} \quad (7-3-25)$$

Сравнение трактовать двояко. Во-первых, без каких-либо предположений о распределении родительской популяции ошибок ($S_{num} + 8TA - SD$), величины E и u_{val} можно сравнить сделать приблизительные выводы о S_{model} . Во-вторых, сделав предположение о распределении родительского населения ошибок ($8num + 8input - SD$), интервал может быть оценена в пределах которого $<5model$ падает с заданной вероятностью. Раздел 6 обсуждает интерпретации результатов проверки.

Без каких-либо предположений о распределений, величины E и u_{val} можно сравнить, чтобы указать, если S_{model} могут присутствовать. Значения E и u_{val} в таблице 7-3-13 показывают, что E примерно в 3 раза больше, чем u_{val} над набором экспериментов. Величина E , что является фактором 3 больше, чем u_{val} находится в диапазоне, что E может быть напрямую связано с S_{model} . Учитывая различие в величинах E и u_{val} , вероятно, включает в себя вклад от V_{model} .

Таблица 7-3-16 Сравнение номинальных значений и стандартных неопределенностей, вычисленных с помощью метода передачи и LHS

Моделирование количества	LHS	Распространение
q_S , Вт	97.2	97.2
u_{input} , Вт	6.79	
Эксперимент		
q_D , Вт	74.9	74.9
u_D , Вт	2.08	2.17
Разница		
$E = q_S - q_D$, Вт	22.3	22.3
u_{val} , Вт	7.03	6.69

Предполагая распределение вероятностей для комбинации всех ошибок, кроме $SMODE$ ошибок моделирование | / интервал может быть оценена в пределах которого $SMODE$ | падает. С чужим распределения для совокупности всех ошибок, кроме ошибки моделирования, коэффициент охвата, k , может быть указан определить расширенную неопределенность, $U_{vta} = k$ Урала, который определяет интервал ($E \pm Lfva$ | J), внутри которого с уровнем уверенности. величина k зависит от распределения вероятностей и уровень доверия. величины для k обсуждаются в подразделе 6-3 для различных распределений вероятностей и уровня доверия. для распределения Гаусса с на уровне достоверности 95%, k это 2.0 интервал, в течение которого $SMODE$ |. падает с $\sim 95\%$ -ной вероятностью, $E \pm 2 u_{val}$, представлена на рис 7-3-7 в случае, один моделирования генерируется на средних условиях пунктирная линия получается с показаны.. границы [10.4, 37.3] Если каждый эксперимент индивидуально моделируется, изменение в величине $5mode$] можно наблюдать Если расширенная неопределенность является для 99% вероятности ($k = 3$) средний интервал для $6MO$ (JE |. расширяется чтобы [3.7,44.0] Вт.

Процедура проверки изложенные в этом документе, является полной в этой точке. Подход в данном документе представляет собой процедуру, чтобы объективно оценить и количественно точность моделирования. Подход привел к оценкам диапазоне характеризующего ошибке S_{modcl} . Вопрос о том, является ли имитационная модель является адекватной зависит от точности, необходимой для приложения. Учитывая исход или процедура проверки, однако, может быть желание повысить точность модели или лучше понять источник $5modcl$. Что делается следующим образом на k процедуре проверки этого документа будет рассматриваться модель развития, а не проверка. Тем не менее, как будет видно, возможность совершенствования модели информируется проверки. Если первоначально оценивали модель улучшается или изменен, чтобы включить в себя дополнительные физику, она может быть оценена с той же процедуре. Оценка второй модели с тем же экспериментальных данных приведены в следующем разделе. Экспериментальные данные не участвовал в обновлении модели. Дополнительные комментарии приведены ниже по вопросу о следующем шаге после оценки проверки.

Процедура проверки может включать некоторое представление о возможном источнике $SMODE$ |. Потенциальные области, чтобы рассмотреть мы обсудим ниже. Было бы полезно рассмотреть эти, даже если исход проверки были благоприятными или приемлемыми.

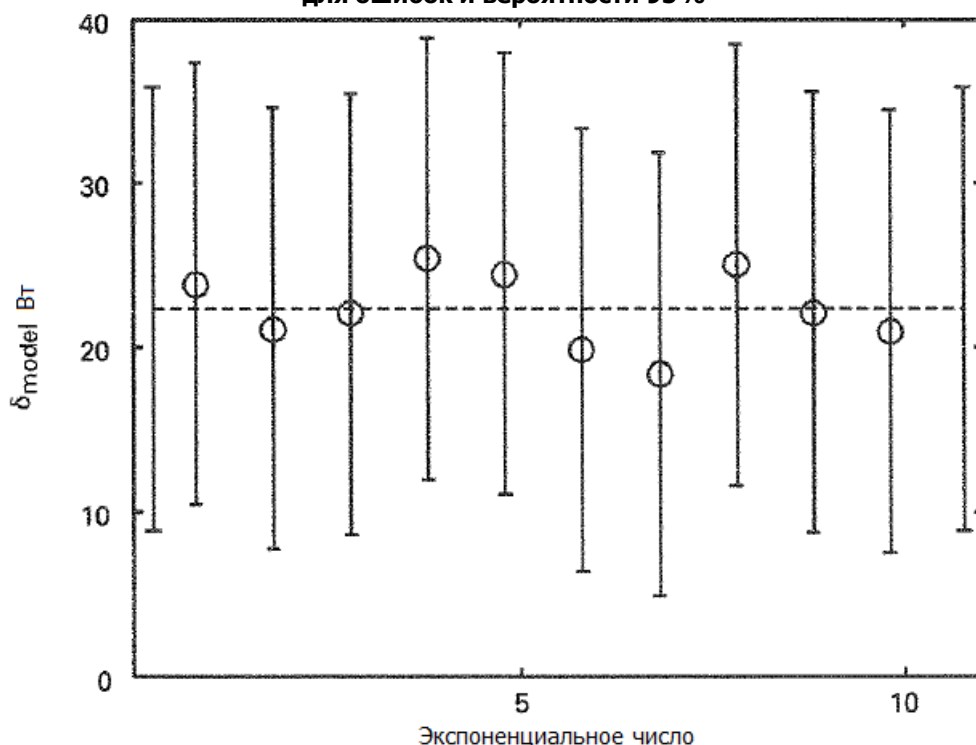
(а) Входы - как номинальные значения и оценки неопределенности - для экспериментального уравнения сжатия данных и моделирования может быть пересмотрена. Номинальные входы или оценки неопределенности не может быть применимо к эксперименту проверки. Факторы Важность (см. Необязательные Приложение В) определить относительный вклад каждого параметра в неопределенности в экспериментальной уравнения сжатия данных и неопределенности в моделировании из-за неопределенности входных потоков. Получение дополнительных данных для номинальной стоимости или неопределенности входного параметра определены как важно может повлиять $8model$.

(б) Проверить адекватность подходов, используемых для распространения неопределенности.

(в) Критические предположения, которые формируют основу для выбранного имитационной модели должны быть пересмотрены. Дополнительные исследования (с помощью моделирования и / или экспериментов)

может означать, что предположение не подходит.

Рис. 7-3-7 Интервал для S_{model} ($E \pm 2u_{val}$) предполагая распределение Гаусса для ошибок и вероятности 95%



7-3.5 Оценка второй модели

Начальная модель для имитации общую скорость передачи тепла от ребра теплообменником предполагается идеальный контакт (бесконечное проводимости контакта, футов) на границе между трубкой и плавника. Дальнейшие исследования и испытания показали, что контакт проводимости между плавника и трубки меньше изначально верили. Для исследования влияния конечной проводимости контакта, моделируемые результаты моделирования в том числе контактной проводимости на границе ребро / трубка рассчитываются. Неопределенность моделирование с контактной проводимости в модели также оценивается. Сравнение проверки на экспериментальных данных повторяется оценить модель с контактной проводимости.

Как только модель была проверена и наблюдается экспериментальные данные, есть много способов, что модель может быть обновлена на более тесное соответствие с экспериментальными данными. Обновления модели могут быть физически мотивированы, но только потому, что обновленная модель больше соответствует экспериментальным данным, не обязательно означает изменение модели физически представляет истинную S_{model} . Некоторые необходимо проявлять осторожность при обновлении модели и формулы изобретения, которые могут быть сделаны, когда обновленная модель оценивается. Цель этого раздела заключается в демонстрации того, как обновленная модель можно оценить и результаты этой оценки. Подход проверка может продемонстрировать ли второй (обновлено) модель является более точным, чем первой модели, но оправдывая целесообразность обновления является вопросом для обсуждения среди модельер, экспериментатора, и, возможно, другие.

7-3.5.1 Имитационная модель с контактной проводимости и неопределенности имитационной модели. Имитационная модель является таким же, как обсуждалось в пункте. 7-3.3, за исключением того, что контакт проводимости определяется на границе ребро / трубка при решении для передачи двумерного тепла в поперечном сечении трубчато-трубки. Вместо идеального контакта на границе ребро / трубка, определяется формулой. (7-3-11), контакт проводимости определяется на границе.

(7-3-26)

Это единственное изменение в имитационной модели. Те же самые значения параметров и величины неопределенности, приведенные в таблице 7-3-6 используются при моделировании. Контактная проводимости в ур. (7-3-26) является $h_c = 150 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ со стандартным систематическую погрешность 20%.

7-3.5.1.1 код верификации. Код процесс проверки описано ранее не включают опцию для конечного проводимости контакта. Эта проверка может быть достигнуто, используя точное решение MMS включая проводимости контакта, как описано в Необязательные Приложении В, результаты не будут представлены здесь в целях экономии места.

7-3.5.1.2 Результаты моделирования. Моделируемой значения общего коэффициента теплопередачи с контактной проводимости, перечислены в таблице 7-3-17. Как это было сделано ранее, и обсуждалось в пункте. 7-3.3.2, два подхода были взяты для имитации эксперименты. Каждый эксперимент был смоделирован, а один моделирование в среднем условий, измеренных в течение 10 опытов была проведена. Моделирование на средних условиях обеспечивается в нижней части таблицы 7-3-17. Обратите внимание, что величина моделируемой общей теплоотдачи с контактной проводимости снизилась до 73,8 Вт от значения 97,2, когда идеально

контакт предполагалось.

7-3.5.1.3 Решение Проверка. Имитационная модель добавляет эффект проводимости контакта между плавника и трубки. Учитывая исход предыдущего сетки уточнения исследования в пункте. 7-3.3.3, и, кроме того утверждая, что контактную проводимость может иметь небольшую зависимость от сетки, проверка решение не возможно, необходимо будет повторить. В предыдущем доказательстве могут быть убедительными, что численная ошибка из-за сетки незначительна. В интересах демонстрации подхода, процесс верификации раствор повторяется для второй модели. Та же последовательность ячеек, обсуждаемых в пункте. 7-3.3.3 используется для выполнения проверки решения. Результаты исследования представлены в таблицах 7-3-19 и 7-3-20 для модели с контактной проводимости включены.

Зависимость общей имитированной интенсивности теплообмена на сетке монотонна. По оценкам наблюдается скорость сходимости для двух сетчатых последовательностей составляет 2,0. Неопределенность для численного неопределенности ничтожно мала; численная неопределенность на два порядка меньше, чем неопределенностью в экспериментальной общей скорости передачи тепла.

Таблица 7-3-17 Значения моделирования общей скорости теплопередачи для модели с контактной проводимостью

Эксперимент	q_{sr} , Вт
1	74.3
2	73.4
3	73.7
4	73.5
5	73.8
6	73.5
7	74.1
8	73.7
9	73.8
10	73.8
Среднее	73.8

Таблица 7-3-18 Значения моделирования общей скорости теплопередачи и стандартной неопределенности для модели с контактной проводимостью

Эксперимент	q_{sr} , Вт	Неопределенность (стандартная)		
		$s_{q_{sr}}$, Вт	$b_{q_{sr}}$, Вт	u_{inputr} , Вт
1	74.3	0.28	5.18	5.19
2	73.4			
3	73.7			
4	73.5			
5	73.8			
6	73.5			
7	74.1			
8	73.7			
9	73.8			
10	73.8			
Среднее	73.8	0.08	5.18	5.18

7-3.5.1.4 Неопределенность моделирования входных параметров. Неопределенность из-за неопределенности входного распространяется по моделированию таким же образом, как описано в пункте. 7-3.3.4. В дополнение к входных параметров, перечисленных в пункте. 7-3.3.4, неуверенность в проводимости контакта включен. Имитационная модель с контактной проводимости будет иметь различные частные производные по параметрам. Частные производные численно рассчитывается с разностной аппроксимации центрального. Масштабированные коэффициенты чувствительности и стандартные неопределенности для параметров приведены в таблице 7-3-21. Неопределенность при моделировании общей интенсивности теплообмена можно оценить из уравнения распространения в пункте. 7-3.3.4 используя данные в таблице 7-3-21. Оба случайные и систематические взносы в неопределенности можно оценить.

Величины случайных и систематических взносов в стандартной неопределенности в общем скорость передачи тепла от подхода распространения приведены в последней строке таблицы 7-3-18. Случайная вклад в общую неопределенность является незначительным по сравнению с систематической основе. Случайная вклад может быть вычислена непосредственно, когда каждый эксперимент индивидуально моделируется. Случайная стандартная неопределенность оценивается по стандартному отклонению в моделируемой общей скорости теплопередачи из 10 экспериментов. Эта оценка для случайной стандартной неопределенности показано около середины Таблица 7-3-18. Хотя эта оценка случайной вклада (по 3 раза) больше, чем значение с подхода распространения, величина незначительна по сравнению с систематической погрешности.

Таблица 7-3-19 Результаты верификации решения для общей скорости теплопередачи для модели с контактной проводимостью

Сетка	h-трубка (Относительное)	h-ребро (Относительное)	q _s , Вт
1	0.125	0.119	74.298318
2	0.25	0.239	74.297087
3	0.5	0.477	74.292162
4	1	1	74.272587

Стандартная неопределенность в моделируемой общей интенсивности теплообмена в связи с неопределенностью входного параметра составляет около 6,9%. Вклад каждого параметра с неопределенностью в симуляции могут быть идентифицированы с факторами важности. Важность факторы обсуждаются в Необязательные Приложение В. Факторы Важность показывают, что коэффициент конвекционного на внешней поверхности трубки (H₂), коэффициент конвективной на внутренней поверхности трубки (фут_г), а проводимости контакта (HC) счета для 99% моделируемой систематической неопределенности в общей скорости передачи тепла; эти параметры составляют 66%, 24% и 9% от систематической погрешности, соответственно.

7-3.5.2 Оценивая проверки неопределенности и Интерпретация проверки Сравнение

7-3.5.2.1 Оценивая Проверка неопределенности, UNI. Неопределенность проверки оценивается с уравнением распространения, как описано в пункте. 7-3.4.1. По сравнению с окончательное уравнение для u_{val} в пар. 7-3.4.1, дополнительный член входит в неопределенности на входе моделирования для проводимости контакта. Уравнение распространения для и, для модели с контактной проводимости является

$$\begin{aligned}
 u_{val}^2 = & \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial \rho} \right) \right]^2 u_{\rho}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial Q} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial Q} \right) \right]^2 u_Q^2 \\
 & + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial C_p} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial C_p} \right) \right]^2 u_{C_p}^2 + \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right]^2 u_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_c} \right)^2 u_{h_c}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{\infty}} \right)^2 u_{T_{\infty}}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_1} \right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_2} \right)^2 u_{h_2}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial h_f} \right)^2 u_{h_f}^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 \\
 & + \left(\frac{\partial q_s}{\partial k_i} \right)^2 u_{k_i}^2 + \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right)^2 u_{T_{o,D}}^2 + u_{num}^2 \\
 & + 2 \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_i} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_i} \right) \right] \left[\left(\frac{\partial q_s}{\partial T_{o,D}} \right) - \left(\frac{\partial q_D}{\partial T_{o,D}} \right) \right] b_{T_i} b_{T_o}
 \end{aligned}
 \tag{7-3-27}$$

Таблица 7-3-20 Меры численной ошибки и численной неопределенности общей скорости теплопередачи для модели с контактной проводимостью

Порядок сеток	p (наблюдаемое)	e _a ²¹ , %	e _{ext} ²¹ , %	GCI _{flpe} ²¹ , %	u _{num} , Вт
Сетка 2 до Сетка 4	1.99	-2.636 e-4	3.520 e-4	3.522 e-4	0.01
Сетка 1 до Сетка 3	2.00	-6.629 e-5	8.837 e-5	8.839 e-5	0.003

Таблица 7-3-21 Частные производные общей скорости теплопередачи для имитационной модели с учетом неопределенных входных данных модели для модели с контактной проводимостью для средних измеренных условий

X _i	X _i $\frac{\partial q_s}{\partial X_i}$, Вт	Стандартная неопределенность	
		Случайная, s _i	Систематическая, b _i
k _t	0.005	...	5%
k _f	0.06	...	5%
h ₁	15.64	...	10%
h ₂	42.00	...	10%
h _f	1.12	...	10%
T _∞	-33.79	...	1%
T _{fi}	107.6	0.070%	0.14%
Q	2.24	0.5%	1.0%
p	2.24	...	0.5%

C_D	2.24	...	1%
h_c	12.81	...	20%

Дополнительный срок для неопределенности в проводимости контакта добавляется в качестве пятого члена уравнения. (7-3-27).

Данные, необходимые для оценки u_{val} перечислены в таблице 7-3-22. Неопределенные параметры, стандартные неопределенности, и масштабные коэффициенты чувствительности для экспериментальной и моделируемой общей скорости теплопередачи приведены в таблице.

Результаты проверки на имитационной модели с контактной проводимости приведены в таблице 7-3-23. Результаты, приведенные суммировать общее передачу тепла от эксперимента и его неопределенность, результат моделирования и его неопределенность из входного неопределенности и числовой неопределенности, ошибка сравнения, и проверки неопределенности U_{VA} из уравнения. (7-3-27). Ошибка сравнение для моделирования с контактной проводимости продемонстрирована иметь величину, меньшую, чем величина u_{val} . Величина u_{val} вычисляется с ур. (7-3-27) пренебрежимо отличается от суммирования квадратов отдельных вкладов стандартной неопределенности из экспериментальных данных и моделирования, предполагая, приблизительно независимость между ними. Это проблема конкретных результатов и в других случаях может иметь иной исход.

7-3.5.2.2 Интерпретация сравнения валидации. Как обсуждалось в параграфе. 7-3.4.3, проверка может быть истолковано двояко. Во-первых, путем сравнения величины ошибки сравнения и неопределенности проверки, приближенные могут быть сделаны выводы о наличии δ_{mode} . Отметив, что $E = \delta$ и V величину $<5\delta_{model}$, если он существует, имеет тот же порядок, что и ошибки в моделировании и экспериментальных данных ($S_{input} - SD$). Во-вторых, сделав предположение о распределении родительского населения ошибок ($\delta_{num} + S_{input} - \xi$), интервал может быть оценена в пределах которого δ_{mode} падает с заданной вероятностью. Для распределения Гаусса с - 95% уровне достоверности, $k = 2,0$. Интервал, в течение которого S_{model} падает с вероятностью 95%, $E \pm 2 u_{val}$, представлена на рис. 7-3-8. Диапазон характеризующий S_{model} примерно $[-12, 11]$ на 95% уровне вероятности.

В этот момент процедура проверки указывает на следующее. Предсказания модели согласуются с экспериментальными наблюдениями для моделируемой неопределенности в осуществлении проверки. Если дальнейшее совершенствование имитационной модели необходимы для инженерного применения (то есть, приложение требует величину средней ошибки для скорости теплопередачи составляет менее 11 Вт), эффективность любой модели изменений не может быть оценена с настоящим эксперименты и нынешние параметрические неопределенности.

Таблица 7-3-22 Параметры, включенные в оценку u_{val} , оценки параметра стандартной неопределенности и коэффициенты параметра чувствительности для модели с контактной проводимостью

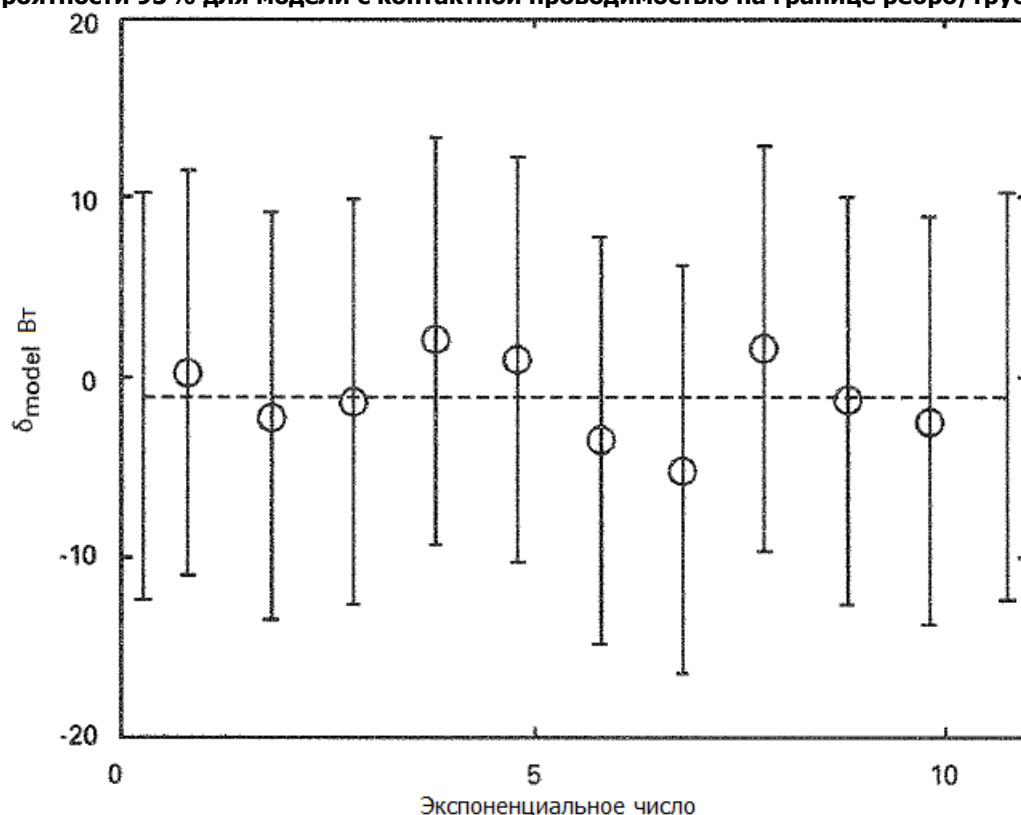
Параметр	Воздействие	Стандартная неопределенность			Масштабные коэффициенты чувствительности	
		Случайная, s_i	Систематическая, b_i	Общая, u_i	$\chi_i \frac{\partial q_D}{\partial \chi_i}$, Вт	$\chi_i \frac{\partial q_S}{\partial \chi_i}$, Вт
T_i (°C)	D и S	0.07%	0.14%	0.16%	1,808	107.55
T_o (°C)	D	0.07%	0.14%	0.16%	-1,734	...
Q (м³/с)	D и S	0.5%	1.0%	1.12%	74.9	2.24
ρ (кг/м³)	D и S	...	0.5%	0.5%	74.9	2.24
C_p (Дж/кг °C)	D и S	...	1.0%	1.0%	74.9	2.24
k_t (Вт/м °C)	S	...	5%	5%	...	0.005
k_f (Вт/м °C)	S	...	5%	5%	...	0.06
h_1 (Вт/м² °C)	S	...	10%	10%	...	15.64
h_2 (Вт/м² °C)	S	...	10%	10%	...	42.00
h_f (Вт/м² °C)	S	...	10%	10%	...	1.12
T_∞ (°C)	S	...	1%	1%	...	-33.79
h_c (Вт/м² °C)	S	...	20%	20%	...	12.81

Таблица 7-3-23 Экспериментальные значения и значения моделирования общей скорости теплопередачи и связанные неопределенности

Эксперимент	q_D , Вт	u_D , Вт	q_S , Вт	u_{input} , Вт	u_{num} , Вт	E , Вт	u_{val} , Вт
1	74.0	2.65	74.3	5.19	0.01	0.27	5.58
2	75.6		73.4			-2.17	
3	75.1		73.7			-1.36	
4	71.4		73.4			2.05	
5	72.8		73.8			1.01	
6	77.0		73.5			-3.49	
7	79.3		74.1			-5.18	

8	72.1		73.7			1.61	
9	75.1		73.8			-1.29	
10	76.2		73.6			-2.43	
Среднее	74.9	2.17	73.8	5.18	0.01	-1.10	5.58

Рис. 7-3-8 Интервал для $t_{\text{model}} (E \pm 2u_{\text{val}})$ предполагая распределение Гаусса для ошибок и вероятности 95% для модели с контактной проводимостью на границе ребро/труба



Оценка «улучшенных» моделей потребует, что неопределенности в экспериментах и соответствующими параметрами, которые используются в моделировании, быть снижены за счет более тщательно контролировать или переработан эксперименты.

7-4 Список литературы

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Bova, S. W., Copps, K. D., and Newman, C. K., "Calore: A Computational Heat Transfer Program," Sandia National Laboratories, report SAND2006-6083P, Albuquerque, NM.</p> <p>[2] Carey, G. F., Oden, J. T., "Finite Elements: Computational Aspects," Volume 03, Prentice Hall, 1984.</p> <p>[3] Incropera and Dewitt, "Introduction to Heat Transfer," Wiley, New York, 1985.</p> | <p>[1] Бова, С. В., Коппс, К. Д., Ньюман, С. К., "Calore: Программа вычислительной теплопередачи," Национальные Лаборатории Сандиа, отчет SAND2006-6083P, Альбукерке, Нью-Мексико.</p> <p>[2] Кэри, Дж.Ф., Оден, Дж.Т., "Конечные элементы: вычислительные аспекты", Том 03, Прентис Холл, 1984.</p> <p>[3] Инкропера и Девитт, "Введение в теплопередачу", Уайли, Нью-Йорк, 1985.</p> |
|--|--|

ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ I. ДЕТАЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА УРАВНЕНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИМЕРА ЗАДАЧИ

I-1 Введение

Целью настоящего обязательного приложения является представление подробного развития уравнений, используемых для моделирования примеров, обсуждаемых в разделах 1, 5 и 7. Физическая задача является горячей жидкостью, протекающей внутри круглой трубы с квадратными ребрами снаружи трубе. Желательно подтвердить модель объемной температуры на выходе, То, текучей среды, протекающей в трубе и для скорости теплопередачи, q , от горячей жидкости. Описание физической задачи показано на рис. 1-4-1 в разделе 1.

I-2 Данные уравнения сокращения для экспериментальных значений q

Общий баланс энергии на жидкость внутри трубки длины, L , является

$$q_D = D = \rho Q C_p (T_i + T_0) \quad (\text{I-2-1})$$

где

C_p — теплоемкость

Q — объемный расход

q_D — общий уровень теплоотдачи, W

$(T_i + T_0)$ — перепад температуры основная жидкость (все для горячей жидкости)

ρ — плотность

Уравнение (I-2-1) является уравнением обработки данных для общего уровня теплопередачи.

I-3 Имитационная модель

Одномерный баланс энергии в стационарном состоянии сосредоточенной массы¹ на длине дифференциала трубки (dz) приводит к (¹Изменения в потенциальной и кинетической энергии, а также осевой теплопроводности игнорируются.)

$$\rho Q C_p \frac{dT}{dz} + 2\pi r_1 U_1 (T - T_\infty) = \rho Q C_p \frac{dT}{dz} + \frac{\bar{U}_1 A_1}{L} (T - T_\infty) = 0 \quad (\text{I-3-1})$$

где

L — длина трубы

$T(z)$ — положение зависит от температуры основная жидкость

T_∞ — (постоянная) температура окружающей среды

\bar{U}_1 — средний коэффициент теплопередачи в целом на основе смачиваемой площади внутренней поверхности трубы ($A_1 = 2\pi r_1 L$)

z — расстояние по трубе

Перед интеграцией уравнения (I-3-1) по длине трубы будут рассмотрены детали того, как вычислить \bar{U}_1 .

I-4 Предполагаемая форма для осевого изменения общего коэффициента теплопередачи, \bar{U}_1

Общие изменения коэффициента теплопередачи предполагаются в виде ряда ступенчатых функций, соответствующих ребристым и неребристым (голым) секциям труб, как показано на рис. I-4-1. Показатели f и nf см. ребристый и неребристые секции труб, соответственно. Аксиально средний коэффициент общей теплопередачи задается следующим уравнением:

$$\frac{1}{L} \int_{z_i}^{z_0} U_1(z) dz = \frac{U_{f1} w_f + U_{nf1} w_{nf}}{w_f + w_{nf}} = \bar{U}_1 \quad (\text{I-4-1})$$

где ширина w_f и w_{nf} определены на рис. 1-4-1 в разделе 1 и

$$L = N(w_f + w_{nf}) \quad (\text{I-4-2})$$

где

N — число конечных / неконечных сегментов

Индекс 1 в уравнении (I-4-1) является напоминанием о том, что U основаны на площади A_1 . Задача получения \bar{U}_1 будет разделено на две части, соответствующие неребристым и ребристым секциям.

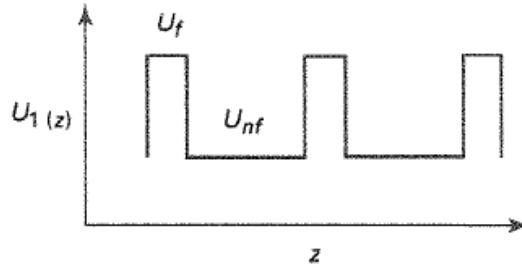


Рис. I-4-1 Изменение локального значения общего коэффициента теплопередачи

I-5 Общий коэффициент теплопередачи для неребристой секции, U_{nf}

Неребристая секция рассматривается как сплошная трубка с конвективной теплопередачей внутри и снаружи. Согласно вводным текстам по теплопередаче общий коэффициент теплопередачи для неребристой секции (для устойчивого одномерной теплопередачи) задается следующим уравнением:

$$U_{nf} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1} + \frac{r_1}{h_2 r_2}} \quad (\text{I-5-1})$$

где

h_1 — конвективные коэффициенты теплопередачи внутри голой трубы

h_2 — конвективные коэффициенты теплопередачи снаружи голой трубы

k_t — теплопроводность трубы

I-6 Общий коэффициент теплопередачи для ребристой секции, U_f

Если ребра на трубе были круглыми, а не квадратными, одномерный результат, аналогичный уравнению (I-5-1) может быть получен аналитически. Однако перенос тепла в квадратном ребре на круглую трубу будет решаться с помощью сетки на основе вычислительной (конечный объем, конечных элементов и т.д.) модели.

Трехмерное моделирование будет включать в круглую трубу и присоединенное к нему квадратное ребро и схематически представлено на рис. I-4-1 в разделе 1. Допускается контактная проводимость между трубкой и ребром. Математическая модель задается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_t \frac{\partial T_t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_t \frac{\partial T_t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_t \frac{\partial T_t}{\partial z} \right) = 0 \text{ tube} \quad (\text{I-6-1})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = 0 \text{ fin} \quad (\text{I-6-2})$$

где ось z направлена вдоль длины трубки. В то время как теплопроводность ребра и трубки записываются внутри производных в уравнениях (I-6-1) и (I-6-2) непосредственно связать значения с местным тепловым потоком, оба проводимости постоянны для этого примера. На внутренней поверхности трубки, граничное условие представляет собой следующее:

$$-k_t \frac{\partial T_t}{\partial r} \Big|_{r_1, \theta} = h_1 [T_{fl} - T(r_1, \theta)] \quad (\text{I-6-3})$$

где

T_{fl} — объемная температура жидкости

θ — традиционная полярная координата для цилиндрической геометрии, В соединении трубы/ребра, где находится контакт проводимости

может находиться h_c

$$-k_t \frac{\partial T_t}{\partial r} \Big|_{r_2^-, \theta} = h_c [T_t(r_2^-, \theta) - T_f(r_2^+, \theta)] = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial r} \Big|_{r_2^+, \theta} \quad (\text{I-6-4})$$

где 1/2 указывает на соединение снаружи/внутри трубки / ребра. На кончике ребра, граничное условие представляет собой следующее уравнение:

$$-k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \Big|_{x_b, y_b} = h_f [T_f(x_b, y_b) - T_\infty] \quad (\text{I-6-5})$$

где

n — координат (наружу) нормаль к внешней поверхности ребра

(x_b, y_b) — оценивается по внешней границе ребра

Из-за симметрии, только одна восьмая сечения будет смоделирована; Границы эти симметрии рассматриваются как адиабатических границ. Передняя и задняя поверхности ребра (s_f) также имеют конвекции в окружающий воздух, и это граничное условие задается

$$-k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \Big|_{s_f} = h_f (T_f|_{s_f} - T_\infty) \quad (\text{I-6-6})$$

Осевая проводимость в трубке игнорируется.

Модель, представленная в уравнениях с (I-6-1) по (I-6-6), решаются с помощью трехмерного кода конечных элементов Галеркина, а общий коэффициент теплопередачи для ребра разделе вычисляется по последующей обработке результатов. Общий коэффициент теплопередачи U_{f1} для секции ребро / трубка определяется посредством уравнения:

$$q_f = U_{f1} \pi d_1 w_f (T_{f1} - T_\infty) = 8 w_f \int_0^{\pi/4} h_1 [T_{f1} - T_t(r_1, \theta)] r_1 d\theta \quad (\text{I-6-7})$$

Решение уравнения (I-6-7) дает

$$U_{f1} = \frac{4}{\pi(T_{f1} - T_\infty)} \int_0^{\pi/4} h_1 [T_{f1} - T_t(r_1, \theta)] d\theta \quad (\text{I-6-8})$$

где $T(r_1, \theta)$ температура при моделировании, уравнения с (I-6-1) по (I-6-6).

Необходима спецификация температуры жидкости для решения модели предоставленной уравнениями с (I-6-1) по (I-6-6). Следует отметить, что T_{f1} изменяется вдоль длины трубки; однако, для линейной модели постоянной собственности рассматриваемой здесь, он утверждается, что U_{f1} вычисляется из уравнения (I-6-8) не будет зависеть от принятого значения для T_{f1} .

I-7 Интеграция уравнения баланса энергии

В уравнении (I-3-1) переменные могут быть разделены чтобы получить:

$$\int_{T_i}^{T_0} \frac{dT}{T - T_\infty} = -\frac{\overline{U}_1 A_1}{\rho Q C_p} \frac{1}{L} \int_{z_i}^{z_0} dz \quad (\text{I-7-1})$$

Оценка интегралов с последующим алгебраическими манипуляциями дает:

$$\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left(-\frac{\overline{U}_1 A_1}{\rho Q C_p}\right) \quad (\text{I-7-2})$$

В подразделе 5-2 переменной валидации является T_0 ; решение уравнения (I-7-2) для переменной валидации дает

$$S = T_{0,S} = T_\infty + (T_i - T_\infty) \exp\left(-\frac{\overline{U}_1 A_1}{\rho Q C_p}\right) \quad (\text{I-7-3})$$

Ошибка сравнения валидации в данном случае представляет собой следующее:

$$E = S - D = T_{0,S} - T_{0,D} \quad (\text{I-7-4})$$

В подразделе 5-3 переменная валидации представляет собой скорость теплопередачи (q), и для нее будет разработано выражение. Дальнейшая алгебраическая манипуляция уравнения (I-7-2) дает вид, удобный для решения теплового потока.

$$\frac{T_i - T_0}{T_0 - T_\infty} = \exp\left(\frac{\overline{U}_1 A_1}{\rho Q C_p}\right) - 1 \quad (\text{I-7-5})$$

Алгебраическая манипуляция уравнения дает (I-7-5)

$$\frac{T_i - T_0}{T_0 - T_\infty} = \frac{\rho Q C_p (T_i - T_0)}{\rho Q C_p (T_0 - T_\infty)} = \frac{q}{\rho Q C_p (T_0 - T_\infty)} = \exp\left(\frac{\overline{U}_1 A_1}{\rho Q C_p}\right) - 1 \quad (\text{I-7-6})$$

Решение уравнения (I-7-6) для скорости теплопередачи дает:

$$q_s = S = \rho Q C_p (T_0 - T_\infty) \left[\exp \left(\frac{\overline{U}_1 A_1}{\rho Q C_p} \right) - 1 \right] \quad (\text{I-7-7})$$

Ошибка сравнения валидации для скорости теплопередачи в данном случае представляет собой следующее:

$$E = S - D = q_s - q_D \quad (\text{I-7-8})$$

I-8 Экспериментальная заданная точка

Заданное значение в эксперименте является безразмерной скорости потока (Re) и задается:

$$\text{Re} = \frac{\rho d_1 V}{\mu} = \frac{4 p Q}{\pi d_1 \mu} \quad (\text{I-8-1})$$

где

V — средняя скорость жидкости внутри трубы

ρ — плотность жидкости внутри трубы

μ — динамическая вязкость жидкости внутри трубы

I-9 Обзор параметров моделирования

Параметры в данном примере могут делиться на категории измеренных значений (в данном эксперименте) и значений базовых данных (или справочных).

Измеренные:² $Q, T_1, T_0, T_\infty, d_1, d_2, L, a, w_f, w_{nf}$ (I-9-1)

(² Для простоты лучше измерять диаметр, d , а не радиус, r , таким образом, диаметр будет рассматриваться как измеренное значение.)

Значения базовых данных: $\rho, \mu, C_p, k_f, k_t, h_1, h_2, h_c, h_f$ (I-9-2)

I-9.1 Специальные обозначения

A_1 — $2 \pi r_1 L$, внутренняя площадь смоченной трубки

A_2 — $2 \pi r_2 L$, внешняя площадь смоченной трубки

a — ширина ребра

C_p — теплоемкость жидкости внутри трубки

D — данные

d_1 — внутренний диаметр трубы

d_2 — внешний диаметр трубы

E — ошибка валидации

h — коэффициент теплопередачи

h_1 — коэффициент теплопередачи внутри трубки

h_2 — коэффициент теплопередачи снаружи трубки

h_c — контактная проводимость на стыке ребра / трубки

h_f — коэффициент теплопередачи, поверхность ребра

k — теплопроводность

k_f — теплопроводность ребра

k_t — теплопроводность трубы

L — длина трубы

N — количество реберных / безреберных секций

Q — объемный расход

q — скорость теплопередачи

q_D — скорость теплопередачи из данных

q_s — скорость теплопередачи из моделирования

Re — число Рейнольдса, $4 \rho Q / (\pi d_1 \mu)$

r — радиус

r_1 — внутренний радиус трубы

r_2 — внешний радиус трубы

T — температура

T_H — объемная температура жидкости, см. уравнения. (I-6-3)

T_i — температура на входе объемной жидкости

T_o — температура на выходе масса жидкости

T_∞ — температура окружающей среды

\overline{U}_1 — общий коэффициент теплопередачи на основе A_1

U_{f_1} — общий коэффициент теплопередачи для реберных труб, на основе A_1

U_{nf_i} — общий коэффициент теплопередачи для безреберных труб, на основе A1
 V — средняя скорость движения жидкости в трубе
 w_f — ширина реберных секций
 w_{nf} — ширина безреберных секций
 x_b, y_b — координаты на внешней границе ребер
 z — осевая координата
 θ — угловое положение
 ρ — плотность жидкости
 μ — динамическая вязкость жидкости

ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ II. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

1,2,3 — показатели уровня сетки, где 1 указывает на самую точную сетку в последовательности
 A_1 — смоченная площадь внутренней поверхности трубки
 A_2 — смоченная площадь внешней поверхности трубки
 a — длина края ребра
 a_j — коэффициент регрессии
 a_0, a_j — коэффициенты регрессии
 A_Ω — область задачи
 A_{Q_i} — площадь элемента i
 b — систематическая стандартная неопределенность
 C — объемная теплоемкость (ρC_p)
 C_p — удельная теплоемкость
 CS — сложный шаг
 D — значение экспериментальных данных
 d_1 — внутренний диаметр трубы
 d_2 — наружный диаметр трубы
 DNS — прямое численное моделирование
 E — ошибка сравнения валидации
 e — ошибка в безразмерной или размерной форме (определяется в контексте)
 E_n — ошибка в решении кода
 FD — конечная разность
 f — дискретные решения
 f^{exact} — аналитическое решение
 $f(h)$ — решение кода для данной сетки
 f_∞ — ограничение высокого разрешения (при отсутствии ошибок округления)
 Fs — коэффициент безопасности
 GCI — показатель конвергенции сетки
 h — мера дискретизации / шаг сетки / размер сетки
 h_1 — коэффициент конвективной теплопередачи внутри голой трубы
 h_2 — коэффициент конвективной теплопередачи снаружи голой трубы
 h_c — контактная проводимость
 h_f — коэффициент конвективного теплообмена на поверхности ребер
 — коэффициент теплопередачи, поверхность ребер
 h_r, h_o — коэффициенты конвективной теплопередачи в пример задачи верификации
 $H.O.T.$ — члены высокого порядка
 IF_i — значение для параметра X_i
 k — коэффициент охвата
 — теплопроводность
 — коэффициент расширения
 k_f — теплопроводность ребер
 k_t — теплопроводность трубы
 L — длина трубы / нелинейный оператор / плиты толщина
 $L_2\ norm$ — интеграл ошибки в области задачи
 LES — моделирование крупных вихрей
 LHS — выборка латинского гиперкуба
 M — произведенное / нетривиальное точное аналитическое решение
 MMS — метод произведенных решений
 N — общее количество ячеек, используемых для вычисления / количество образцов / количество реберных / безреберных секций / второе произведенное решение
 n — число узлов
 N_g — количество сеток
 n_{LHS} — количество образцов LHS
 n_p — количество параметров
 p — очевидный / наблюдаемый порядок метода / давления

Q — объемный расход / функция источника
 $Q(r, \theta)$ — пространственно изменяющийся исходный термин
 q — тепловой поток / расход тепла
 q_D — скорость теплопередачи из данных
 q_n — нормальный тепловой поток
 qS — скорость передачи тепла из моделирования
 R_c — контактное сопротивление
 RE — экстраполяция Ричардсона
 Re — число Рейнольдса
 RMS — среднеквадратическое
 r — результат / отношение шага сетки / радиальная координата
 r_1 — внутренний радиус трубы
 r_2 — наружный радиус трубы
 S — значение решения моделирования
 SEM — метод уравнения чувствительности
 s — случайная стандартная неопределенность
 T — температура
 \mathbf{T} — истинное значение
 t — время
 T_H — объемная температура жидкости
 t_f — окончательное время
 T_i — начальная температура или температура на входе основная жидкость
 T_o — температура на выходе масса жидкости
 T_f — температура ребра
 T_t — температура трубы
 T_∞ — температура окружающего воздуха
 u — стандартная неопределенность
 \overline{U}_1 — аксиально усредненный коэффициент общей теплопередачи
 u_D — стандартная неопределенность в экспериментальном значении данных
 U_{f1} — общий коэффициент теплопередачи для ребра на основе A1
 U_{nf1} — общий коэффициент теплопередачи для безреберных труб на основе A1
 u_h — стандартная неопределенность предоставленные дискретизацией
 u_i — стандартная неопределенность предоставленная по (оценочной) ошибке итерации
 u_{input} — стандартная неопределенность в значении моделирования решения вследствие ошибок во входных данных моделирования
 u_{num} — стандартная неопределенность в значении моделировании решения вследствие численного решения уравнений
 u_{val} — неопределенность стандарта валидации
 $U_{\%}$ — расширенная неопределенность для % уровня доверия
 V — скорость осевого движения
 v — зависимая переменная
 $V(t, x)$ — выбранное/указанное/точное решение
 w_f — толщина ребра
 w_{nf} — расстояние между ребрами на теплообменнике
 X — входные параметры
 Y — численная неопределенность X
 x, y, z — координаты местоположения
 α — теплопроводность или другой коэффициент диффузии
 Δt — время дискретизации
 ΔV — объем ячейки
 ΔX_i — возмущение в параметре X
 Δz — дискретизация в пространстве
 δ — ошибка
 δD — ошибка в значении экспериментальных данных
 δ_{input} — ошибка в значении решения моделирования вследствие ошибок во входных данных моделирования
 δ_{model} — ошибка в значении решения моделирования вследствие допущений моделирования и приближений
 δ_{num} — ошибка в значении моделирования решения вследствие численного решения уравнений
 δ_S — ошибка в значении решения моделирования
 ε — оценка результата / ошибки
 $\varepsilon_{21}, \varepsilon_{32}$ — изменение в переменной решения по сеткам 2 и 1, 3, и 2, соответственно
 μ — вязкость динамики жидкости
 Θ — полярная координата для цилиндрической геометрии
 ρ — плотность

σ — стандартное отклонение родительской популяции
 φ — безразмерное аналитическое решение / численное решение
 φ_{ext}, f_{ext} — экстраполируемые значения φ, f

НЕОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ А. МЕТОД ПРОИЗВЕДЕННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРИМЕРА ЗАДАЧИ

А-1 Введение и обоснование

Как описано параграфе 2-3.3, метод произведенных решений (MMS) обеспечивает методологию для верификации кода, который был успешно продемонстрирован в различных кодах PDE. Для сложных моделей с большой цепью правил дифференцирования, компьютер символическое манипулирование рекомендуется для оценки исходного значения Q. По этой детальной проблемой образца, мы ограничимся поколения выпускаемой решений (MS), которые просты и могут быть легко подтверждены стороны расчеты. Использование символической манипуляции, более общность в MS могут быть использованы и более общие черты код может осуществляться в проверке кода.

Пошаговое описание разработок приведены в уравнениях (А-2-2) и (А-2-3) с некоторым дальнейшим обсуждением данной в уравнении. (А-2-4). Для читателей, заинтересованных только в результатах, они приведены в разделе А - 5.

А-2 MMS #1: 2-D, Нелинейная проводимость, один материал

Геометрия задачи и маркировка границы приведены на рис. 7-2-1 статьи 7. Данная задача с одним материалом будет определяться в зависимости от $r = 1$ наружу в области ребер. Обратите внимание на *внешний* радиус трубки, составляющий $r = 1$. Все уравнения безразмерные. Симметрия дает нулевой тепловой поток = 0 на поверхностях 3 и 4.

Декартовы координаты или любые могут быть использованы для определения MS, но конкретная задачи симметрия предполагает полярные координаты. Этот выбор позволит нам построить в нулевой потока граничных условий на поверхностях 3 и 4, и позволяют простой оценку потоков на поверхностях 1 и 2.

ПРИМЕЧАНИЕ: MS будет построен в полярных координатах, однако код FEM верифицируемый не будет использовать эту систему координат; решение и его выражение являются двумя различными понятиями. Аналогичным образом хотя решение будет разработано в безразмерных переменных, код может использовать эти или размерные переменные; необходимо только преобразовать MS в размеры, используемые в коде (или наоборот).

Координата r (безразмерная) варьируется от $r = 1$ в некоторой r_{max} и θ от $\theta = 0$ до $\theta = \pi/4$. Симметрия требует $T_\theta = 0$ на поверхностях 3 и 4.

Основное уравнение

$$\nabla \cdot k \nabla T = 0 \quad (\text{А-2-1})$$

$$r \frac{\partial}{\partial r} [rkT_r] + \frac{\partial}{\partial \theta} [kT_\theta] = 0 \quad (\text{А-2-2})$$

Чтобы получить удобные аналитические произведенные решения без использования символических манипуляций, предполагается, что проводимость k линейно изменяется с температурой.

$$k = K + ST \quad (\text{А-2-3})$$

где K и S являются константами. (Примечание: все члены снова являются безразмерными и последовательным.) Данное руководящее PDE написано в (нелинейной) рабочей форме.

$$L(r, \theta, T) = 0 \quad (\text{А-2-4})$$

$$L(r, \theta, T) \equiv r \frac{\partial}{\partial r} [r(K + ST)T_r] + \frac{\partial}{\partial \theta} [(K + ST)T_\theta] \quad (\text{А-2-5})$$

В расширенном виде,

$$L(r, \theta, T) \equiv r \frac{\partial}{\partial r} [KT_r + KrT_{rr} + STT_r + SrT_r^2 + SrTT_{rr}] + [KT_{\theta\theta} + ST_\theta^2 + STT_{\theta\theta}] \quad (\text{А-2-6})$$

Аналитическая форма для произведенного решения $T(r, \theta) = M(r, \theta)$ выбрана таким образом, чтобы нулевое состояние потока $T_\theta = 0$ удовлетворялось на поверхностях 3 и 4, при $\theta = 0$ и $\pi/4$. Форма также выбрана для простоты оценки производных, обеспечивая при этом все производные всего заказа существуют и не равны нулю, за исключением на границах нулевой потока. Выбранная форма является

$$M(r, \theta) = e^r \cos(4\theta) \quad (\text{А-2-7})$$

Форма MS не выбрана для реальной картины. (Более привлекательная «реалистичная» форма может использовать e^{-r} , однако будет немного усложнить производные оценки без добавления значения к кода упражнения верификации.)

Затем исходное значение MS $Q(r, \theta)$ оценивается путем пропускания решения $M(r, \theta)$ через оператора L [т.е., заменяя M из уравнения (A-2-7) для T в L из уравнения (A-2-6)]. Необходимые производные легко оцениваются и просты по форме.

$$M_r(r, \theta) = e^r \cos(4\theta) = M(r, \theta) \quad (\text{A-2-8})$$

$$M_{rr}(r, \theta) = M(r, \theta) \quad (\text{A-2-9})$$

$$M_\theta(r, \theta) = -4e^r \sin(4\theta) = -4 \tan(4\theta) M(r, \theta) \quad (\text{A-2-10})$$

$$M_{\theta\theta}(r, \theta) = -16e^r \cos(4\theta) = -16M(r, \theta) \quad (\text{A-2-11})$$

Это производит модифицированное уравнение, которое необходимо решить в кода верификации упражнения.

$$L(r, \theta) = Q(r, \theta) \quad (\text{A-2-12})$$

$$Q(r, \theta) = r[KM + SM^2] + r^2[KM + 2SM^2] - 16\{KM + SM^2[1 - \tan^2(4\theta)]\} \quad (\text{A-2-13})$$

Точное решение для (нормальной, безразмерной) теплового потока на поверхности 1 (при $r = 1$, внешнему радиусу трубы) является

$$q_r|_1(r, \theta) = -kT_r = -(K + ST)T_r = -(KM + SM^2) \quad (\text{A-2-14})$$

Поверхность 2 не совпадает ни с координатой описании MS. На поверхности 2, тепловой поток может быть записана в декартовой системе координат, выровненных в направлении нормали N , положительный наружу. В точке (r, θ) на поверхности 2,

$$q_n|_2(r, \theta) = -kT_r = -k[T_r \cos \theta - \frac{1}{r} T_\theta \sin \theta] \quad (\text{A-2-15})$$

Используя производные MS из уравнений. (A-2-8) и (A-2-10) (безразмерный) тепловой поток задается

$$q_n|_2(r, \theta) = -(K + SM)[M \cos \theta + \frac{4}{r} M \tan 4\theta \sin \theta] \quad (\text{A-2-16})$$

Граничные условия на поверхности 1 и 2, используемые в кода взяты из MS, по тем или иным условия проверяется. Спецификации функция издание (Дирихле) или градиент (неоднородная Нойман) граничные условия просты, как указано выше в уравнениях (A-2-8), (A-2-9), (A-2-10), и (A-2-11). Конвективный тепловой поток граничные условия больший интерес. Они должны соответствовать ньютонов теплопередачу определяется конвективных коэффициентов теплоотдачи h_i и h_0 . Они могут быть удовлетворены путем указания либо пространственно различной h или пространственно различной жидкости или воздуха температуры T_f и T_∞ . Все эти условия физически нереально, но это не имеет никакого значения в математике проверки кода. Реализация пользовательского спецификации ред постоянная h является наибольший интерес для проверки кода, поэтому мы будем указать различную T_f и T_∞ . Обратите внимание, что никаких физических законов не нарушаются, однако требуется некоторая гибкость кода. Теплопередача Ньютона дает тепловой поток $q \sim \Delta T$ или

$$q(r, \theta) = h(r, \theta) \Delta T \quad (\text{A-2-17})$$

На поверхности 1 коэффициент указан h_i . Тогда теплопередача Ньютона дает следующее уравнение:

$$T_f(r, \theta) = q_r|_1(r, \theta) / h_i(r, \theta) + M(r, \theta)|_1 \quad (\text{A-2-18})$$

Точно так же на поверхности 2,

$$T_\infty(r, \theta) = q_n|_2(r, \theta) / h_0(r, \theta) + M(r, \theta)|_2 \quad (\text{A-2-19})$$

Простота выбранного MS, вероятно, может пропустить конкретного и вряд ли ошибки кодирования. Поскольку MS такова, что $M_{rr} = M_r = M$, ошибка в кода, используя полярные координаты так, чтобы T_{rr} был использован, где T_r требовалось (или T_r для T и т.д.) не будут обнаружены. В нынешней ситуации, это вряд ли ситуация избежать, поскольку

- (а) код не использует полярные координаты
- (б) второй MS бы обнаружить даже эту ситуацию.

Появление отрицательных температур не имеет никакого значения, математически или физически, для задачи проводимости. Тем не менее, некоторые коды теплопроводности настроены, чтобы позволить только абсолютные температуры >0 , чтобы избежать проблем с точки зрения излучения (не считаются здесь). Если это затруднение, простой аддитивный T_{shift} могут быть использованы для обеспечения всех $T > 0$.

А-3 MMS #2: 1-D, Линейная проводимость, два материала с контактным сопротивлением

Задача геометрии и маркировка границ приведены на рис. 7-2-1 статьи 7. Данная задача с двумя материалами будет определяться на основе $r = r_i$ извне. Область трубы расширяется от радиуса внутренней трубы $r = r_i$ к радиусу наружной трубки при $r = 1$. Область ребра расширяется от границы с материала на наружной поверхности трубы³ (Примечание: внешний радиус трубы составляет $r = 1$ для обеих задач #1 и #2. Поверхность 1 равна $r = 1$ для Задачи #1 (с одним материалом)) и поверхность 1 равна $r = r_i$ для задачи # 2 (с двумя материалами).) радиус $r = 1$ для некоторых значений r_{\max} .

В данном втором MS в дополнение к верификации обработки двух материалов контактным сопротивлением, обработка кода конвекции от ребра будет верифицирована; параметр кода $h_f > 0$. Отметим, что для верификации кода используется философия «стеклянного ящика» [1-5] [т. е. признается и используется, что за исключением в высшей степени надуманных контрпримеров, ошибка, допущенная при кодировании условий конвекции будет проявляться в задаче постоянной проводимости, а также в задаче переменной проводимости, поскольку не существует связи между членом конвекции и коэффициентами в переменной проводимости (K и S в $k = K + ST$)]. Кроме того, поскольку конвективная теплопередача зависит только от локальной температуры, а не производных θ , может быть использован удобный MS без θ -зависимости. Если возможна одна из таких непрочных связей тонкий соединительный возможно, то потребуются более полный MS [1-5]. Настоящая задача будет проверять маловероятную связь между конвекцией и контактным сопротивлением.

Все уравнения в данном разделе являются безразмерными, и то же справочные (нормализация) размерные величины должны использоваться в обеих областях. Например, если размерные проводимости в областях трубы и ребер являются K_t and K_f можно использовать любой из них, чтобы получить безразмерные проводимости k_t и k_f , однако должно использоваться для обоих одинаковое значение K .

$$\begin{aligned} k_t &= K_t / K_t = 1 \text{ и } k_f = K_f / K_t \\ \text{или} \\ k_t &= K_t / K_f \text{ и } k_f = K_f / K_f = 1 \end{aligned} \quad (\text{A-3-1})$$

Симметрия дает нулевой тепловой поток $= 0$, таким образом, $T_\theta = 0$ на поверхностях 3 и 4. Основное уравнение:

$$\nabla \cdot k \nabla T + Q_{conv} = 0, k = k_t \text{ или } k_f \quad (\text{A-3-2})$$

$$T_r + r T_{rr} = 0 \quad (\text{A-3-3})$$

где Q_{conv} — конвективная теплопередача (на единицу площади ребра) от ребра воздуху при T_∞ . Согласно определению коэффициента конвективной теплопередачи h_f ,

$$Q_{conv} = h_f (T_f - T_\infty) \quad (\text{A-3-4})$$

Основное PDE написано в (линейной) операторной форме

$$L(r, \theta) = 0 \quad (\text{A-3-5})$$

$$L(r, \theta) = T_r + r T_{rr} + h_f (T - T_\infty) \quad (\text{A-3-6})$$

где $h_f = 0$ в области трубы. Произведенное решение выбирается в виде составляющей из двух функций, M в области трубы и N в области ребер,

$$\text{Решение} = M \cup N$$

$$M(r, \theta) = e^r \quad (\text{A-3-7})$$

$$N(r, \theta) = A e^r + B \quad (\text{A-3-8})$$

Тогда исходные члены MS $Q(r, \theta)$ в областях трубы и ребер оцениваются прохождения решений $M(r, \theta)$ и $N(r, \theta)$ через оператора L [т.е., заменяя M из уравнения (A-3-7) и N из уравнения (A-3-8) для T в L уравнения из (A-3-6)]. Необходимые производные легко оцениваются и просты по форме.

$$M_r(r, \theta) = e^r = M(r, \theta) \quad (\text{A-3-9})$$

$$M_{rr}(r, \theta) = e^r \quad (\text{A-3-10})$$

$$N_r(r, \theta) = A e^r \quad (\text{A-3-11})$$

$$N_{rr}(r, \theta) = A e^r \quad (\text{A-3-12})$$

Это производит модифицированное уравнение, которое необходимо решить в примере верификации кода:

$$L(r, \theta) = Q(r, \theta) \quad (\text{A-3-13})$$

где Q представляет собой совокупность двух исходных членов, определенных в областях трубы и ребер,

$$Q(r, \theta)|_t = (1+r)e^r \quad (\text{A-3-14})$$

$$Q(r, \theta)|_f = A(1+r)e^r + h_f A e^r + h_f B \quad (\text{A-3-15})$$

Следует отметить, что требование к гладкости Q на границе отсутствует.

Значения MS для тепловых потоков оцениваются как в MMS # 1, обращая внимание на то, что все T_θ и $T_\infty = 0$, и что M для этой задачи имеет тот же r -функциональный вид, как MMS # 1, однако при $S = 0$. Таким образом, тепловые потоки на поверхности 3 и 4 равны нулю. Точное решение для нормального теплового потока при $r = 1$, внешнего радиуса трубы (не поверхностно-1, но R 5 1) следующим образом. Следует отметить, что в $e^r|_{r=1} = e = 2,71828...$

$$q_r|_0(r, \theta) \equiv q_r|_{r=1}(r, \theta) = -k_t e, \quad e = 2,71828... \quad (\text{A-3-16})$$

(Нормальный) тепловой поток на поверхности 1 (при $r = r_i$, *внутренний* радиус трубы) составляет

$$q_r|_i(r, \theta) = -k_i e^{r_i} \quad (\text{A-3-17})$$

(Нормальный) тепловой поток на поверхности 2 составляет

$$\begin{aligned} q_n|_2(r, \theta) &= -k_f A e^r \cos(\theta) \\ &= -k_i e^r \cos(\theta) \end{aligned} \quad (\text{A-3-18})$$

Наличие k_t в последней форме может быть неожиданным и является результатом конкретного MS.

А-3.1 Состояние граничного потока

Как отмечалось ранее, постоянные A и B не произвольны, а определяются условиями границы. Непрерывность теплового потока через границу обеспечивается; иначе, член исходный Q потребует дельта-функция Дирака.

Эта непрерывность требует

$$\text{труба } q_r|_i(r, \theta) = \text{fin } q_r|_i(r, \theta) \quad (\text{A-3-19})$$

$$k_t T_r|_{r=1}(r, \theta) = K_f T_r|_{r=1} \quad (\text{A-3-20})$$

(Обобщение $k_t > k_f$ сохраняется в данном разделе для возможного использования в будущем.) Для составного MS,

$$k_t M_r|_{r=1}(1, \theta) = k_f N_r(1, \theta) \quad (\text{A-3-21})$$

$$k_t \exp(1) = k_f A \exp(1) \quad (\text{A-3-22})$$

$$A = k_t / k_f \quad (\text{A-3-23})$$

А-3.2 Состояние граничного температурного скачка

Температурный скачок на границе определяется по контактному сопротивлению $R_c = 1/h_c$. Скачок температуры на границе обозначается δT_c и оценивается по определению контактного сопротивления интерфейса, R_c .

$$\delta T_c = |q_c| R_c \quad (\text{A-3-24})$$

где q_c — тепловой поток на границе. Данное q_c может оцениваться либо со стороны трубы либо со стороны ребер. При выбранной (нереалистической) форме MS, $T_r > 0$ по всей длине, и $T_f > T_t$ на границе. Таким образом,

$$T_f|_c = T_t|_c + \delta T_c \quad (\text{A-3-25})$$

Оценивая поток со стороны трубы (для ее более простой формы) дает

$$T_f|_c = T_t|_c + k_t T_r|_{c,t} \quad (\text{A-3-26})$$

Для MS на стороне трубы,

$$N|_c = M|_c + R_c k_t M_r|_c \quad (\text{A-3-27})$$

$$A \exp(1) + B = \exp(1) + R_c k_t \exp(1) \quad (\text{A-3-28})$$

$$B = e \times (1 - A + R_c k_t) = e \times (1 - k_t / k_f + R_c k_t), \quad e = 2,71828... \quad (\text{A-3-29})$$

Следует отметить еще раз, что все значения k безразмерные.

Следует отметить, что для вырожденного случая $k_t = k_f$ и $R_c = 0$, правильные условия $A = 1$ и $B = 0$ получаются (то есть ребер решение N просто продолжением трубы решения M). Кроме того, значимое решение получено для трубы и ребер изготовлены из того же материала ($k_t = k_f$), но все еще с ненулевым контактного сопротивления.

Если $k_t / k_f = 1$, тогда:

$$A = 1, \\ B = eR_c k_t, \quad e = 2,71828... \quad (\text{A-3-30})$$

А-4 Дальнейшее обсуждение

1-D MS для второй задачи здесь выражено в двухкомпонентной полярной системе (r, θ) . Если дискретизация система кода проверяется были основаны в полярных координатах, это 1-D форма решение не будет осуществлять многомерную дискретизацию (для граничных производных в поверхности 2, за исключением). Тем не менее, для кода FEM проходит испытания здесь, и любой код (FEM, FVM, FDM, псевдо-спектрального и т.д.) для этого геометрии задачи, которая использует граничные встроенные координаты или неструктурированной сетки, не является предпочтительным направлением. Код будет на самом деле оценить ненулевых многомерных производных для любой ненулевой конечного разрешения сетки. Дискретизации FEM будут осуществляться в r и θ . Дискретные решения не будет 1-D, так как сетка или система координат не обладает полярной симметрией решения. Только как $\Delta \rightarrow 0$ будет θ -зависимость $\rightarrow 0$. Это дает еще один показатель для сетки конвергенции. Точное значение для T_θ и $T_{\theta\theta} = 0$. Сходимость расчетной T_θ и $T_{\theta\theta} \rightarrow 0$ может отслеживаться и должна сходиться на ожидаемом уровне; например, для метода второго порядка, необходимо найти следующее:

$$\text{расчетное } T_\theta = \text{ошибка в } T_\theta \cong C\Delta^p \quad (\text{A-4-1})$$

для p точного метода порядка ($p = 2$ для второго порядка). Как $\Delta \rightarrow 0$, C должны \rightarrow постоянная. Это типично для всех задач симметрии. Если симметрия не вдоль координат, используемая в коде для описания задачи, дискретные решения не будут проявлять симметрию за исключением случаев $\Delta \rightarrow 0$.

Подход здесь в нарушении верификации MMS кода на две задачи составляет таким же, как рекомендуется для проверки коды сверхзвуковых вязких течений [1, 3]. Вместо того, чтобы выполнять все это в одной задаче, строятся два MS. Первый MS является сжимаемым, однако полностью дозвуковой решение, предназначенное для тестирования вязкие члены в том числе моделей турбулентности, сохранения массы и т.д. — все, кроме ударного захвата. Второй MS является более ограниченным и только тестирует алгоритмы перехвата ударных с использованием постоянных свойств, ни турбулентность и простая геометрия.

Что-то должно быть известно о структуре алгоритма, кода, и задачи, чтобы оправдать эту сегментацию.

Алгоритмы ударного захвата обычно не взаимодействуют с этими другими дискретизаций. Такой же подход используется для разделения проверку химии, радиоактивный распад, и т.д. и легко основания пред ред потому что эти члены не связаны пространственные производные [1-3].

Выбор 2-D руководящих уравнений для исходного программного кода был сделан. Косвенным образом, предполагается, что плавник тонкий, в том смысле, что в первую очередь проводимости в плоскости ребра, и изменение температуры через ребра толщиной игнорируется. Выбор MMS моделирования включают также предположение, что любая конвекции от вершины ребра ничтожно мала по сравнению конвекции от плоских ребер поверхностей. (Эта функция предполагается проверить в обычных тестах без MMS.) Ли это хорошие приближения или нет, они моделируют приближения, а не численных приближений. То есть, ошибки, вносимые этих приближений, не упорядочены в Δ ; ошибки не $\rightarrow 0$, как $\Delta \rightarrow 0$, и, следовательно, их значение не будет выявлено упражнениями кода верификации на основе MMS или любых других точных решений этих смоделированных уравнений. Это не вопрос проверки кода (т.е. кода правильности), но моделирования.

А-5 Обзор произведенных решений

А-5.1 Обзор MMS #1: 2-D, Нелинейная проводимость, одним материал

Эта задача одного материала определяется исходя из $r = 1$ наружу, в ребер регионе. Следует отметить, что *внешний* радиус трубы равен $r = 1$. Все уравнения в данном разделе являются безразмерными. Симметрия дает нулевой тепловой поток $= 0$, таким образом, $T_\theta = 0$ на поверхностях 3 и 4. Основным уравнением является:

$$\nabla \cdot k \nabla T = 0 \quad (\text{A-5-1})$$

$$r \frac{\partial}{\partial r} [rkT_r] + \frac{\partial}{\partial \theta} [kT_\theta] = 0 \quad (\text{A-5-2})$$

Предполагается, что проводимость k линейно зависит от температуры.

$$k = K + ST \quad (\text{A-5-3})$$

где K и S являются постоянными. Основное PDE написано в (нелинейной) операторной форме

$$L(r, \theta) = 0 \quad (\text{A-5-4})$$

$$L(r, \theta) \equiv r[KT_r + KrT_{rr} + STT_r + SrT_r^2 + SrTT_{rr}] + [KT_{\theta\theta} + ST_\theta^2 + STT_{\theta\theta}] \quad (\text{A-5-5})$$

произведенное решение выбирается (не для реальной картины), как

$$M(r, \theta) = e^r \cos(4\theta) \quad (\text{A-5-6})$$

Это производит модифицированное уравнение, которые необходимо решить в упражнении по верификации кода,

$$L(r, \theta) = Q(r, \theta) \quad (\text{A-5-7})$$

$$Q(r, \theta) = r[KM + SM^2] + r^2[KM + 2SM^2] - 16\{KM + SM^2[1 - \tan^2(4\theta)]\} \quad (\text{A-5-8})$$

Точное решение для (нормального) теплового потока на поверхности 1 (при $r = 1$, *внешний* радиус трубы) составляет

$$q_r|_1(r, \theta) = -(KM + SM^2) \quad (\text{A-5-9})$$

и (нормальный) тепловой поток на поверхности 2 составляет:

$$q_n|_2(r, \theta) = -(K + SM)[M \cos \theta + \frac{4}{r} M \tan 4\theta \sin \theta] \quad (\text{A-5-10})$$

Граничные условия на поверхностях 1 и 2, используемые в коде, взяты из MS уравнения. (A-5-7) какие бы условия ни проверялись. Указанная функция или граничные условия градиента являются прямыми ($T = M$, $T_r = M_r$ и т.д.). Конвективные граничные условия использовать указанные коэффициенты конвекции h_i и h_0 с пространственно различающейся температурой окружающей среды. На поверхности 1,

$$T_f(r, \theta) = q_r|_1(r, \theta) / h_i(r, \theta) + M(r, \theta)|_1 \quad (\text{A-5-11})$$

На поверхности 2,

$$T_\infty(r, \theta) = q_r|_2(r, \theta) / h_0(r, \theta) + M(r, \theta)|_2 \quad (\text{A-5-12})$$

A-5.2 Обзор MMS #2: 1-D, Линейная проводимость, двух материалов с сопротивлением контактов

Эта задача с двумя материалами определяется на основе $r = r_i$, наружу.

Область трубы проходит от внутреннего радиуса трубы $r = r_i$ к наружному радиусу трубы при $r = 1$. Область ребер расширяется от границы материала на внешнем радиусе трубы $r = 1$ до некоторой величины r_{\max} .

Все уравнения являются безразмерными, и то же задание (нормализация) размерные величины должны использоваться в обоих регионах.

Основное PDE написано в (линейной) операторной форме

$$L(r, \theta) = 0 \quad (\text{A-5-13})$$

$$L(r, \theta) = T_r + rT_{rr} + h_f(T - T_\infty) \quad (\text{A-5-14})$$

где $h_f = 0$ в области трубы. Произведенное решение выбирается в виде составляющей из двух функций, M в области трубы и N в области ребер,

$$\text{Решение} = M \cup N$$

$$M(r, \theta) = e^r \quad (\text{A-5-15})$$

$$N(r, \theta) = Ae^r + B \quad (\text{A-5-16})$$

Постоянные A и B не произвольны, а определяются граничными условиями в непрерывности теплового потока и температурного скачка, определенного контактным сопротивлением R_c .

$$A = k_t / k_f \quad (\text{A-5-17})$$

$$B = e \times (1 - k_t / k_f + R_c / k_t), \quad e = 2,71828... \quad (\text{A-5-18})$$

Это производит модифицированное уравнение решать в кода верификации упражнений,

$$L(r, \theta) = Q(r, \theta) \quad (\text{A-5-19})$$

где Q — совокупность двух исходных членов, определенных в области трубы и ребер,

$$Q(r, \theta)|_t = (1 + r)e^r \quad (\text{A-5-20})$$

$$Q(r, \theta)|_f = A(1 + r)e^r + h_f Ae^r + h_f B \quad (\text{A-5-21})$$

Точное решение для (нормального) теплового потока при $r = 1$, *внешний* радиус трубы (не поверхность 1, а $r = 1$)

$$q_r|_0(r, \theta) = -k_i e, \quad e = 2,71828... \quad (\text{A-5-22})$$

(Нормальный) тепловой поток на поверхности 1 (при $r = r_i$, внутренний радиус трубы) составляет:

$$q_r|_i(r, \theta) = -k_i e^{r_i} \quad (\text{A-5-23})$$

(Нормальный) тепловой поток на поверхности 2 составляет:

$$q_n|_2(r, \theta) = -k_f A e^r \cos(\theta) \quad (\text{A-5-24})$$

A-6 Список литературы

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Roache, P. J. (1998), <i>Verification and Validation in Computational Science and Engineering</i>, Hermosa Publishers, Albuquerque, August 1998.</p> <p>[2] Knupp, P. and Salari, K. (2002), <i>Verification of Computer Codes in Computational Science and Engineering</i>, CRC Press, Boca Raton.</p> <p>[3] Roache, P. J. (2002), "Code Verification by the Method of Manufactured Solutions," <i>ASME Journal of Fluids Engineering</i>, Vol. 114, No. 1, March 2002, pp. 4–10.</p> <p>[4] Roache, P. J. (2004), "Building PDE Codes to be Verifiable and Validatable," <i>Computing in Science and Engineering</i>, Special Issue on Verification and Validation, September/October 2004, pp. 30–38.</p> <p>[5] Pelletier, D. and Roache, P. J. (2006), "Verification and Validation of Computational Heat Transfer," Chapter 13 of <i>Handbook of Numerical Heat Transfer</i>, Second Edition, W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, and J. Y. Murthy, eds., Wiley, New York.</p> | <p>[1] Роуч, П. Дж. (1998), <i>Верификация и валидация в области вычислительной науки и техники</i>, Издательство Hermosa, Альбукерке, август 1998.</p> <p>[2] Кнупп, П. и Салари, К. (2002), <i>Верификация компьютерных кодов в вычислительной науке и технике</i>, CRC Press, Бока-Ратон.</p> <p>[3] Роуч, П. Дж. (2002), «Верификация Кодов методом производимых решений», Журнал ASME по технике жидкостей, Часть 114, № 1, март 2002, стр. 4–10.</p> <p>[4] Роуч, П. Дж. (2004), «Разработка кодов PDE, пригодных для валидации и верификации», <i>Вычисления в области науки и техники</i>, Специальный выпуск Верификация и валидация, сентябрь/октябрь 2004 г., стр. 30–38.</p> <p>[5] Пеллетье, Д. и Роуч, П. Дж. (2006), «Верификация и валидация в вычислительной теплопередаче», Глава 13, <i>Справочник по численному теплообмену</i>, второе издание, В. Дж. Минкович, Е. М. Спарроу и Дж. И. Мерти, ред., Уайли: Нью-Йорк.</p> |
|--|--|

НЕОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПОКАЗАТЕЛИ ВАЖНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

В-1 Введение

Поскольку вычислительное моделирование может содержать большое количество параметров, желательно иметь метрику, чтобы упорядочить значимость этих параметров. Для менее важных параметров значений базовых данных может быть более чем достаточно. Для более важных параметров может быть необходимо проведение отдельных экспериментов, чтобы уменьшить их вклад в общую неопределенность моделирования.

Выбор метода для определения параметра важности будет зависеть от метода, используемого для распространения неопределенности посредством моделирования. Методы оценки параметров важности будут представлены здесь для среднего значения и методов отбора проб, представленных в разделе 3.

В-2 Показатели важности для коэффициента чувствительности (локального) метода распространения неопределенности параметров

Для локального метода выборки показатели важности логически вытекают из результата распространения основной неопределенности, уравнение (3-2-1) для некоррелируемых параметров. Это уравнение можно записать в следующем виде:

$$u_{\text{input}}^2 = \left(\bar{X}_2 \frac{\partial S}{\partial r X_1} \frac{u_{X_1}}{\bar{X}_1} \right)^2 + \left(\bar{X}_2 \frac{\partial S}{\partial X_2} \frac{u_{X_2}}{\bar{X}_2} \right)^2 + \dots \quad (\text{B-2-1})$$

где $u_{X_i} = \frac{\bar{X}_i}{\bar{X}_i}$ — относительная стандартная неопределенность в параметре X_1 и \bar{X}_i в номинальном значении параметра; это обычная практика указывать относительную неопределенность, особенно когда используется экспертное заключение. Члены $\bar{X}_i \partial S / \partial X_i$ часто называют коэффициенты чувствительности масштабирования (не безразмерные) и имеют единицы моделирования S.

Если уравнение (B-2-1) разделить на u_{input}^2 , получаем следующее уравнение:

$$1 = \frac{1}{u_{\text{input}}^2} \left(\bar{X}_1 \frac{\partial S}{\partial r X_1} \frac{u_{X_1}}{\bar{X}_1} \right)^2 + \frac{1}{u_{\text{input}}^2} \left(\bar{X}_2 \frac{\partial S}{\partial X_2} \frac{u_{X_2}}{\bar{X}_2} \right)^2 + \dots \quad (\text{B-2-2})$$

Показатель важности для параметра \bar{X}_i просто представляет собой:

$$IF_i = \frac{1}{u_{\text{input}}^2} \left(X_i \frac{\partial S}{\partial X_i} \frac{u_{X_i}}{X_i} \right)^2 \quad (\text{В-2-3})$$

Показатель важности для параметра X_i означает дробную вклад параметра X_i для ввода u_{input}^2 (не u_{input}).

В-3 Показатели важности параметров для выборки (глобального) метода распространения параметров неопределенности

Для выборки (глобальным) методом неопределенность оценивалась с использованием стандартных методов статистической обработки для различных реализаций моделирования S ; явное вычисление коэффициентов чувствительности не требовалось.

Следовательно, для того чтобы использовать уравнение (В-2-3) для вычисления показателей важности для метода выборки, некоторые метод должен быть использован для первой информации чувствительности вычислить. Общий подход заключается в предположении, линейную зависимость между моделирования S и параметрами X_j в виде:

$$S = a_o + \sum_{j=1}^{n_p} a_j X_j \quad (\text{В-3-1})$$

где a_j — коэффициенты регрессии; эта связь предполагает, что параметры не коррелируют. Показатель «идентификатор объекта» или «модель поверхности отклика» часто применяется в уравнении (В-3-1). Чувствительность моделирования S к изменениям в параметрах X_i могут быть получены путем дифференцирования экв. (В-3-1) по отношению к интересующего параметра, что дает

$$\frac{\partial S}{\partial X_i} = a_i \quad (\text{В-3-2})$$

Это идентификатор объекта первого порядка (в параметрах) или модель поверхности отклика результатов метода выборки дает значения глобальной чувствительности, аналогичные локальным коэффициентам чувствительности, полученным с помощью конечных разностей. Используя коэффициенты чувствительности, вычисленные из уравнения (В-3-2), показатели важности могут быть вычислены из уравнения (В-2-3).

Стандартные методы могут быть использованы для вычисления коэффициентов регрессии в уравнении (В-3-1). Тем не менее, необходимо соблюдать осторожность. Так как коэффициенты чувствительности имеют единицы, связанные с ними, они могут различаться на несколько порядков. Например, объемная теплоемкость и теплопроводность нержавеющей стали 304 при комнатной температуре приблизительно равна $3,7 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $14,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, соответственно. Данное несоответствие величин может быть принято, если уравнение регрессии записывается в следующем виде:

$$S = a_o + \sum_{j=1}^{n_p} \underbrace{\bar{X}_j a_j}_{\beta_j} \frac{X_j}{\bar{X}_j} \quad (\text{В-3-3})$$

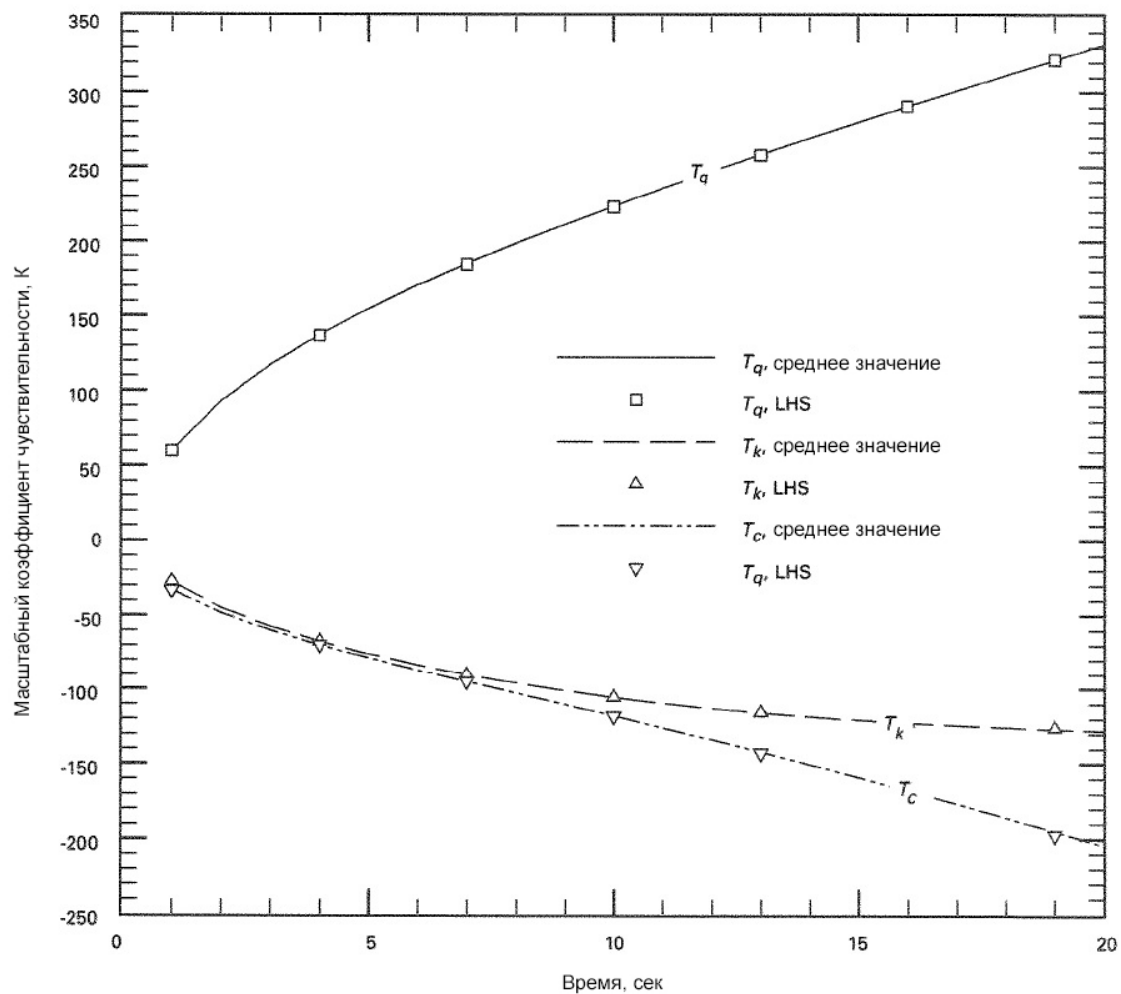
и $\beta_j = \bar{X}_j a_j$ решается для непосредственно. Для одного примера задачи, такой подход улучшил кондиционирование линейных уравнений регрессии за счет уменьшения числа обусловленности (см. ссылку [1] для определенности определению) с 4×10^{15} до $8,9 \times 10^3$.

После того, как масштабированные коэффициенты чувствительности определены из линейного регрессионного анализа, показатели важности могут быть рассчитаны из уравнения (В-2-3). Регрессионный анализ высшего порядка может быть выполнен в сочетании с методами выборки, однако вероятно потребуются дополнительные образцы.

В-4 Сравнение локальных и глобальных показателей важности

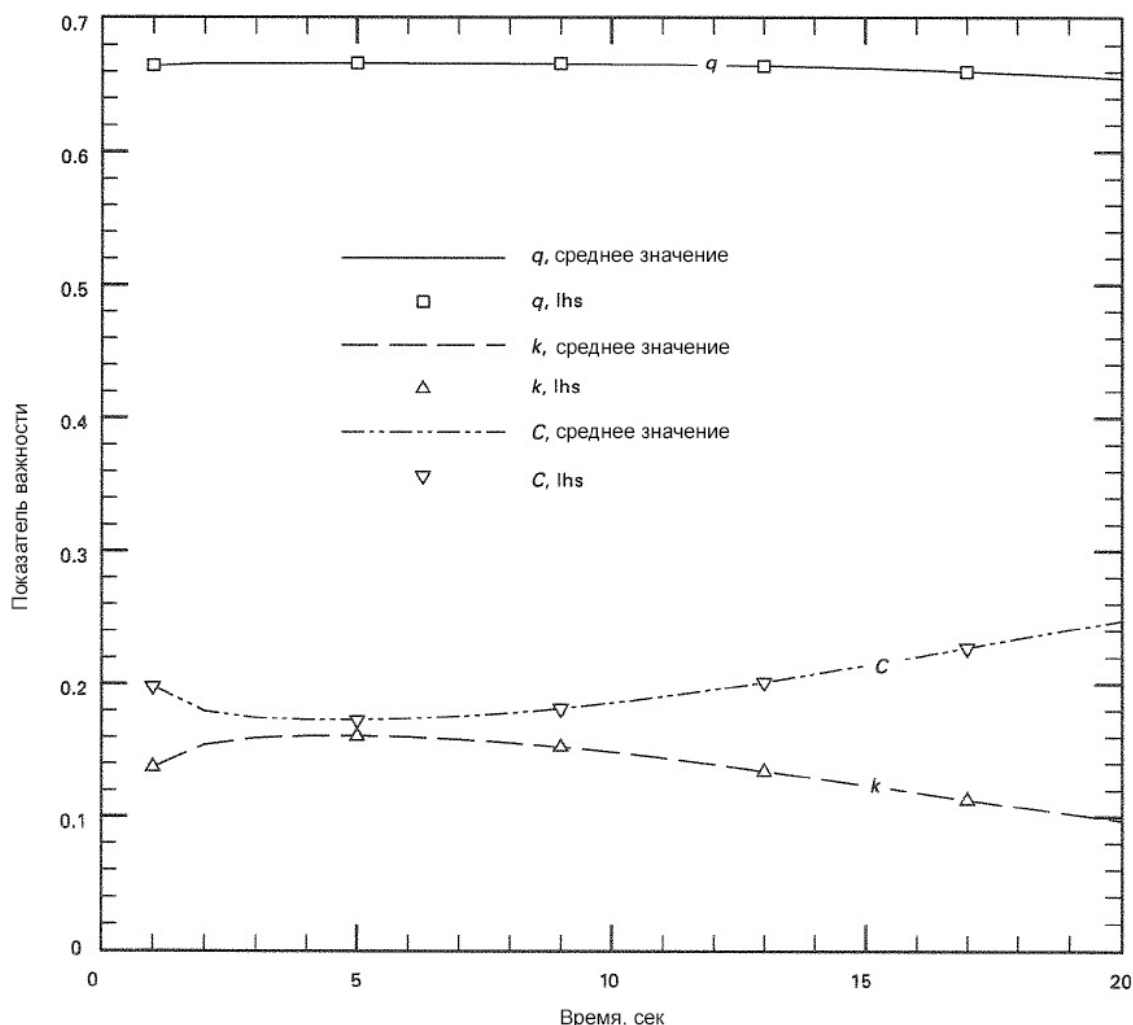
Показатели важности далее вычисляются для пример задачи с постоянным тепловым потоком, представленной в разделе 3, с использованием как локальных, так и глобальных методов. Для глобального метода выборки использовался линейный метод поверхности отклика, определяемый в уравнении (В-3-1) в опытах с 10 LHS (кода FD, 11 узлов) для вычисления масштабных коэффициентов чувствительности, и эти результаты показаны на Рис. В-4-1. Для сравнения также показаны конечные результаты разницы метода второго порядка, которые определены в уравнении (3-2-4). Результаты этих двух методов для вычисления коэффициентов чувствительности (как с использованием конечных разностей дискретизации на той же сетке) довольно хорошо согласуются. Согласование для потока тепла, q , является лучшим, поскольку модель является линейной в q .

Рис. В-4-1 Масштабные коэффициенты температурной чувствительности при $z/L = 0$ для задачи постоянного теплового потока с использованием среднего значения и LHS с моделью линейного поверхностного отклика



ОБЩЕЕ ПРИМЕЧАНИЕ: Опыты были проведены с числовым кодом (конечная разность с 11 узлами).

Рис. В-4-2 Сравнение показателей важности для примера постоянного потока ($z/L = 0$), полученное из среднего значения и LHS с решением конечной разности (11 узлов)



Показатели важности, которые определены в уравнении (В-2-3), были также вычислены для данного примера задачи с помощью указанных выше двух методов, и результаты приведены на рис. В-4-2; результаты очень последовательны. Неопределенность в тепловом потоке является безусловно доминирующим фактором в суммарную неопределенности.

В-5 Обзор

Для вычисления коэффициентов важности для локальных и глобальных методов распространения неопределенности был представлен метод, основанный на коэффициенте чувствительности. Численные результаты для примера задачи с постоянным тепловым потоком очень последовательны для этих двух методов распространения неопределенности; расширение этого вывода до конкретной задачи должны быть подкреплены дополнительными расчетами. Не следует слишком сосредотачиваться на величине различий в этих двух методах, вместо этого следует сосредоточиться на том, чтобы порядок был одинаковым для обоих методов. При желании уменьшить значение u_{input} для примера задачи, снижение неопределенности в тепловом потоке будет гораздо более плодотворным, чем сокращение неопределенности в двух других параметров. Информация, такая как показатели важности, является одной из самых важных вещей, полученных из вычислительного анализа неопределенности.

Оба из представленных методов распространения неопределенности использовали относительный вклад в дисперсию как показатель важности. Альтернативные показатели важности рассматриваются в работе [2].

В-6 Список литературы

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Gerald, C. F. and Wheatley, P. O., <i>Applied Numerical Analysis</i>, Addison-Wesley, Reading, MA, 5th ed., 1985.</p> <p>[2] Helton, J. C. and Davis, F. J., "Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems," <i>Reliability Engineering and System Safety</i>, Vol. 81, 2003, pp. 23–69.</p> | <p>[1] Джеральд С. Ф., Уитли П. О. Прикладной численный анализ, Эдисон-Уэсли, Ридинг, Массачусетс, 5-е изд., 1985 г.</p> <p>[2] Элтон Дж. С., Дэвис Ф. Дж. «Выборка методом Латинского гиперкуба и распространение неопределенности при анализах сложных систем», Проектирование надежности и система безопасности, часть 81, 2003 г., с. 23-69.</p> |
|---|--|

В-7 Специальные обозначения

$a_o; a_j$ — коэффициенты регрессии

IF_i — показатель важности

L — толщина плиты

n_p — число параметров

S — результат моделирования

u — стандартная неопределенность в результате моделирования S

u_X — стандартная неопределенность в параметре X

X_i — параметр i

\bar{X}_i — номинальное значение параметра i

z — расстояние ниже нагреваемой поверхности

$\beta_j = X_j a_j$

НЕОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ С. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕМАТИКИ

С-1 Введение

В данном приложении рассматриваются некоторые дополнительные темы, которые, хотя и являются важными для валидации и верификации, однако не вписываются в поток основного документа. Темы, которые охвачены, начиная с верификации кода до расчетной верификации, валидации и калибровки, следующие:

- (а) Другие способы применения метода произведенных решений
- (б) Верификация решения с адаптивными сетками или зональное моделирование
- (в) Наименьшие квадраты GCI
- (г) Граничные ошибки в дальнем поле
- (д) Специальная и общая чувствительность модели
- (е) Параметрическая неопределенность и неопределенность формы модели
- (ж) Эксперименты по валидации
- (з) Уровень валидации в сравнении с пройденной / не пройденной валидацией
- (и) Численные калибровки

С-2 Другие способы применения метода произведенных решений

Несмотря на то, что любой новое применение MMS, очевидно, потребуют некоторого размышления и, скорее всего, приведет к новому пониманию, MMS — это зрелая методология. Она уже была применена к широкому кругу задач, в том числе гидродинамики из Дарси потока через гиперзвука, ударных волн, несколько моделей турбулентности, реагирующей химии, излучения (серого и спектральной), простых задач структур, 3-D зависит от времени свободной поверхности течь, поток грунтовых вод с переменной плотностью, нелинейных электрических полей лазерных электродов, эллиптической сеток, лазерная инициативе электрического разряда, отслеживание частиц и даже задач на собственные значения. Особенности обеспечить не проблема, но возможность; производительность сходимость кода и алгоритма можно систематически оценивать по разным сингулярности формам, таких как $1/r$, $1/r^2$, $\ln(r)$ путем включения их в произведенные решения. Богатство потенциальных применений не свидетельствует о ранней стадии развития метода, но его власти. Для дополнительной информации и истории метода MMS см. список литературы [1-5].

Процедура MMS обнаруживает все заказанные ошибки. Он не выявляет кодирования ошибки, которые не влияют на ответ, полученный (например, ошибки в итерационной процедуре решения, которые влияют только итерационный скорость сходимости). В настоящем зрении, эти ошибки не рассматриваются в качестве вопросов код верификации, так как они влияют только эффективность кода, а не точность. Кроме того, MMS не оценить адекватность неупорядоченных приближений моделирования, таких как расстояние к оттоку границы. Ошибки этих приближений не исчезают, как $h \rightarrow 0$, следовательно, являются «неупорядоченные прибли-

жения». Адекватность этих приближений должна оцениваться по тестам чувствительности, которые могут быть описаны как упражнения «обоснования» [1].

Как правило, лучше разработать выпускаемое решение в исходное («физическое пространство») координаты (x, y, z, t) . Затем то же решение может быть использовано непосредственно с различными неортогональными сетками или преобразованиями координат.

Некоторые старые коды (потока подземных вод и другие коды) были построены с зашитыми однородных граничных условий Неймана, $\partial f / \partial n = 0$. Вместо изменения кода, можно просто ограничить выбор выпускаемой функций решения, чтобы соответствовать жесткий проводной значения. Кроме того, для проверки периодические граничные условия, нужно выбрать периодическую функцию для производства раствора.

См. список литературы [1, 3] для следующих тем:

- (а) первые применения концепций MMS
- (б) приложения к нестационарным систем
- (в) приложения к нелинейным системам уравнений, в том числе полного Навье-Стокса (с моделированием турбулентности RANS) в общих неортогональными координат
- (г) с использованием коммерческих пакеты символьной математики для обработки алгебраической сложности условий исходных MMS
- (д) обсуждения и примеры смешанного фи RST-и secondorder разностей
- (е) малый параметр (высокий число Рейнольдса) задачи
- (ж) тонкости, касающиеся времени с точностью до направленно сплит алгоритмы на границах
- (з) Возможны проблемы с неоднозначности
- (и) экономика размерности
- (й) применения MMS в 3-D кодов поколения сетки
- (к) последствия сильной и неуместным координировать растяжения
- (л) отладка с выпускаемой решений (когда код Проверка начальная результат отрицательный)
- (м) примеры многих изготовлены или иным надуманным аналитических решений в литературе
- (о) приблизительно, но очень точные растворы (часто полученные методами возмущений), которые также могут быть использованы в проверки кода
- (п) возможность полезного теоремы, связанные с MMS
- (р) особые соображения, необходимые для турбулентности моделирования и других областях с различных масштабах

- (с) MMS Код подтверждения с 3-D сетки-гусеничный перемещения свободной поверхности
- (т) код надежность
- (у) примеры замечательной чувствительности проверки кода через систематического тестирования сетки конвергенции

См. список литературы [3], особенно для деталей слепой тестирования MMS по отладке сжимаемой кода потока.

Кроме оригинальной использования в проверки кода, MMS была использована для оценки методов проверки решения.

В этом приложении, MMS используется для генерации реалистичных точные решения RANS турбулентных течений для проведения оценки методов расчета проверки, как GCI и наименьших квадратов GCI, для оценки итерационных ошибок, и для оценки ошибки, связанные с оттока граничных условий; см. список литературы [1, 2, 4-9]. Методы выявления особенностей в вычислительные механики деформируемого твердого тела, также были оценены с этим подходом, называется «Настроенные тестовые задачи» в список литературы [10, 11]. MMS можно также использовать в разработке кода для того, чтобы решатель работает правильно на любом сетки раствора; хотя и не строго вопрос валидации и верификации, это, тем не менее полезно.

С-3 Верификация решений с адаптивными сетками или зональным моделированием

Разработка адаптивных сеток решений представляют собой эффективную методику для повышения точности. Адаптация может быть осуществлено либо структурированных или неструктурированных сетках, и может быть такого типа, распределение ресурсов (как правило, для структурированных сеток), в котором определенное количество элементов, перемещены для улучшения точности как развивается решение, или типа обогашения, в которых общая число элементов меняется по мере развития решение. В любом подходе, приспособление приводится в какой-то мере уменьшения ошибки. В целях валидации и верификации, существенно, что мера ошибки адаптивность, как правило, местные и не такой же оценкой погрешности (метрическая) необходимы для проверки решения. Кроме того, некоторые Запас прочности > 1 по-прежнему необходима для преобразования любого оценку погрешности в неопределенности U_{num} . Для проверки решения по сетке укрупнения или уточнения, адаптивность должен быть выключен. Проверка Код осложняется также адаптивности. (Для дальнейшего обсуждения, см. список литературы [1, 5].)

Еще один мощный подход моделирования включает в себя зональный моделирование, в котором различные уравнения, которые применяются в различных физических зон. Это также требует специального рассмотрения для проверки решений и проверки кода. (Для некоторого обсуждения, см. ссылки [1, 5].)

С-4 Наименьшие квадраты GCI

При наблюдении скорости сходимости p более 4 или более сетям далеки от постоянного или шумной, Эка и Хокзстра [12-19] разработали наименьшее процедуру квадратов для определения эффективной p , которая

обеспечивает улучшенную оценку неопределенности для сложных проблем. Для очень сложных реальных задачах, более чем минимальные четыре сетки может быть необходимой; они получают [19] «довольно стабильные результаты, используя около шести сетки с общей достаточности уточнения ближайшее 2». мере процедура квадраты рекомендуется для шумных проблем p , с дополнительной стадии ограничения максимального p , используемый в GCI теоретическому p . С другой стороны, там, кажется, нет оснований категорически отвергают наблюдаемую $p < 1$, который обычно означает, что самой грубой сетке несколько вне асимптотической диапазоне, и в результате оценка неопределенности GCI будет излишне консервативным [20, 21]. Это не является препятствием для публикации или отчетности.

Подход наименьших квадратов был применен с несколькими моделями конвергенции в том числе один срок разложения неизвестно порядка p рассматриваемой здесь, а также одно-, двух- или трехчленных разложении с фиксированными показателями. Самый простой метод работает хорошо, и рекомендуется, следующим образом. Предполагаемый одночленное расширение ошибки дискретизации является:

$$f_i - f_\infty \cong \alpha \Delta_i^p \quad (\text{C-4-1})$$

Подход наименьших квадратов основан на минимизации функции

$$S(f_\infty, \alpha, p) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_g} [f_i - f_\infty + \alpha \Delta_i^p]^2} \quad (\text{C-4-2})$$

где число сеток N_g должно быть > 3 , а запись f_∞ (не ссылок [12-19]) предполагает, предел разрешения (при отсутствии ошибки округления). Установка производные S по отношению к e , α , p равна нулю приводит к

$$f_\infty = \frac{1}{N_g} \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} f_i - \alpha \sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^p \right\} \quad (\text{C-4-3})$$

$$\alpha = \frac{N_g \sum_{i=1}^{N_g} f_i \Delta_i^p - \left(\sum_{i=1}^{N_g} f_i \right) \left(\sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^p \right)}{N_g \sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^{2p} - \left(\sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^p \right) \left(\sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^p \right)} \quad (\text{C-4-4})$$

$$\sum_{i=1}^{N_g} f_i \Delta_i^p \log(\Delta_i) - f_\infty \sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^p \log(\Delta_i) - \alpha \sum_{i=1}^{N_g} \Delta_i^{2p} \log(\Delta_i) = 0 \quad (\text{C-4-5})$$

Последнее уравнение является нелинейным и решается итеративно ложным методом положения для наблюдаемой p . Как уже отмечалось, рекомендуется, чтобы максимальное p ограничивалось теоретической p для использования в GCI, и если p беспорядочным, более высокий коэффициент безопасности $F_s = 3$ может быть использован.

С-5 Граничные ошибки в дальней зоне

В разделе 2 некоторая дискуссия была дана ошибки из-за оттока пограничного положения и других ошибок граничных дальнего поля, но расположение такой оценки ошибок в процессе проверки не был указан.

В обычной практике, часто игнорируются. Она не похожа на условия в U_{num} , потому что это не упорядоченный ошибка (не заказывать в Δ). (См. дальнейшее обсуждение в работе [1].) В зависимости от условий, применяемых на этих границах,

ошибка может быть (и часто бывает) систематическое, и, следовательно, трудно оправдать в том числе в неопределенности. Он может

однозначно быть включены как часть сильного чувственного ошибки моделирования (см. ниже). В этом стандарте, он был предполагается, что эта ошибка меньше, чем других ошибок рассмотрены.

С-6 Специальные и общие значения модели

«Модель» в общем смысле (часто называют «слабой моделью») является модель формы, общая математическая формулировка (например, несжимаемые уравнения Навье-Стокса, или закон Фурье теплопроводности). «Модель» в определенном смысле (часто называют «сильным модель») включает в себя все значения параметров, граничные значения и начальные условия, необходимые для определения той или иной проблемы (например, число Рейнольдса, аэродинамический профиль и угол атаки, или проводимость и теплоемкость).

Конкретные параметры и граничные значения, необходимые для запуска моделирования, так в некотором смысле, только специфика может быть подтверждено. То же самое верно для экспериментального подтверждения физических теорий (например, есть только конкретные образцы физических случаев). Тем не менее, после проверки много конкретных случаев, существует тенденция к обобщению. Понятно, что турбулентность в виду модельеры, когда они говорят, что *модель* $k-\epsilon$ была подтверждена для вложенных пограничных слоев в благоприятных градиентов давления, но проверка не пройдена в неблагоприятных градиентов давления. Подробности будут меняться в зависимости от конкретных случаев (профилей, Re , M и т.д.), но есть ощущение, что общая модель $k-\epsilon$ проверяется в диапазоне пространстве параметров, т.е. области проверки. Таким

образом, один выполняет конкретную модель проверки, что в конечном счете приводит к ансамбля вообще валидации модели или на уровне общин принятия общей модели.

Еще неоднозначность терминологии происходит в проблемных зонах, в которых конкретный сетка будет иметь долгосрочное использование. Это происходит прежде всего в геофизическое моделирование, в том числе сайта моделирования для свободной поверхности потоков, потока подземных вод и транспортного моделирования, моделирования океана и моделирование погоды и климата, но это не ограничивается этим. Здесь слово "модель" может включать в себя конкретный меш и даже конкретные алгоритмы дискретизации. Это приводит к противоречиям, поскольку сближение проверка тест сетки затем предполагает изменение «модель». В валидации и верификации 10 [22] было ясно дано понять, что определение, принятое в нем для модели не включает сетку, позицию занимают также в настоящем стандарте. Тем не менее, валидация и верификация 10 [22] рассматривает матричные решатели как часть *модели*, позиция, которая, если формально интерпретировать, потребует повторной валидации для каждого изменения в настройках кода, которые выбирают решатель. В некоторых дисциплинах, слово «модель» часто используется как синоним «кода». Используемый в настоящем документе, можно было бы не говорить о «верификации модели», потому что эта модель быть подтверждено (физика), в то время как численные алгоритмы и кодирования и сетки должны быть проверены (математика). Это было бы невозможно пересмотреть, а не так, чтобы игнорировать, эти существующую практику так контекст придется вести читателя.

С-7 Параметрические неопределенности и неопределенности формы модели

Тщательное изучение проверки должны рассмотреть параметрическую неопределенность, термин u_{input} в уравнение. (1-5-10), используя методы, описанные в разделе 3. Оценка u_{input} имеет смысл только после того, как заданное значение (номинальные значения) моделирование была завершена. Но учтите, что некоторые (даже все) из параметров в модельной постановке можно считать зашитыми значения присущи модели, и поэтому не вкладчики для u_{input} . Если рассматривается, что *все* значения параметров закреплены в модели, это предел того, что было названо подходом «сильной модели». См. список литературы [1] для дальнейшего обсуждения, истории и последствий в философию научного обоснования.

В дополнение к параметрической неопределенности, *неопределенность формы модели* (и что более важно, модель формы ошибки) возникает тогда, когда неполная физика включены в модель. Различие между параметрической неопределенности и модели формы неопределенности может быть серым. Например, в плавник трубки теплообменника проблеме разделе 7, контакт проводимость термин h_c впервые считается зашитыми (полный контакт или контактное сопротивление $= 1 / h_c = 0$). Во второй модели, используемой, h_c рассматривается как параметр задачи. Код с возможностью рассмотрения h_c может быть запущен с $1 / h_c = 0$ (т. е. фиксированный параметр), из-за незнания h_c . С той же моделью и кодом, то же отсутствие знаний параметра h_c могут быть отнесены либо модели формы неопределенности и неопределенности входного параметра. Любой выбор является приемлемым, но в документации должно быть ясно.

Оба параметрической неопределенности и модель формы неопределенность обычно присутствуют, и оба вносят вклад в неопределенность проверки. С или без оценки u_{input} , ни неопределенность игнорируется; их последствия просто привести к суммарную неопределенность проверки. При параметрической неопределенности полностью проанализированы, неопределенность проверка в результате сравнения экспериментальных результатов с результатами моделирования является модель формы неопределенность.

Стоит различать параметрической неопределенности в оценочной работы против параметрической неопределенности в упреждающего анализа (например, [23]). При параметрической неопределенности количественно в оценочной работы, остальные модели формы неопределенность не игнорируются; скорее, это проявляется в неопределенности проверки. То есть, модель формы неопределенность оценивается неопределенности проверки в уравнение. (1-5-10). Тем не менее, в прогнозирующем анализе (в котором физический ответ неизвестен), полный охват параметрической неопределенности нельзя предположить, чтобы покрыть все возможные результаты, поскольку типовая форма неопределенности не представлена. В приведенном выше примере с теплообменником ребристой трубы, если проверка направлена на распределение температуры по всему теплообменнику, то неограниченное изменение других параметров не достичь соглашения для физической проблемы доминируют контактного сопротивления. Таким образом, даже полное исследование параметрической неопределенности в упреждающего анализа не учитывает всех источников ошибок моделирования.

С-8 Эксперименты по валидации

Проверяющие эксперименты разработаны специально для проверки [1, 24, 25]. Требования к валидации различны, и проверочные эксперименты легче в некоторых отношениях, но сложнее в других. В аэродинамике, например, акцент в предварительно вычислительные дней был на аэродинамической трубе экспериментов, которые пытались повторить условия свободного полета. Большие усилия были израсходованы на достижение почти равномерное поступление и модель верность, и на минимизации стену и блокирования эффектов. Последние необходимые мелкие физические модели, которые пожертвовали параметр верность (число Рейнольдса) и обострению геометрических задач верности.

Концепция эксперимент проверки подходит к проблеме по-другому, жертвуя некоторыми верностями между потоком в аэродинамической трубе и свободного полета, но требует, чтобы больше почти полную информацию об условиях эксперимента и данных полевых были получены. Нет больше так важно добиться равномерного притока, но очень важно, чтобы сообщить в деталях, что эти пространственно различные условия притока являются, таким образом, что они могут быть введены в компьютерное моделирование. (Это прискорбный факт, что многие эксперименты, даже те, якобы разработаны как проверочные эксперименты, являются неконтролируемыми и не поддаются измерению.) Принцип в том, что если проверка модель хороша (любыми критериями соответствуют) для потока, возмущенного от свободного полета условия, вероятно, будет хорошо для состояния свободного полета. Таким образом блокированию эффекты не такие основные вопросы (а стенки канала само по себе может быть смоделирована), и модели могут быть больше (или туннели меньше и, следовательно дешевле), тем самым улучшая точность числа Рейнольдса и геометрии модели. Аналогичные ситуации возникают и в других экспериментальных полях. Характеристики хороших экспериментов проверки обсуждаются в работах [1, 24, 25].

C-9 Уровень валидации в сравнении с пройденной/не пройденной валидацией

Разница существует в использовании слова *валидация* в отношении или нет задается допустимое отклонение для соглашения между экспериментом и моделирования (т.е. пройденной/не пройденной оценки). Полная валидация модели может рассматриваться в два этапа: во-первых, сравнение прогнозов модели с экспериментальными значениями, ведущие к оценке точности модели, и, во-вторых, определение пройденной/не пройденной точности для конкретного применения. В некоторых вариантах использования модель, результаты которой были по сравнению с экспериментами помечен подтверждено независимо от договоренности, достигнутой. В самом широком использовании термина, утвержденной то не качество кода / модели как таковой, а просто относится к процессу. Проведенные до крайности, эта точка зрения дается обозначение проверенную даже очень бедных моделей. Мы не рекомендуем это использование. Более умеренный использование является, чтобы считать модель подтверждено, независимо от достигнутого соглашения, но прямо заявить, что модель проверяется с точностью $E \pm u_{val}$ определяется из следующих процедур в настоящем стандарте.

Таким образом, заявление валидации дает количественную оценку, но не доходит до жесткой пройденной / не пройденной, так как это требует рассмотрения проектной, стоимость, риск и т.д. Другая крайность делает проверки конкретного проекта, указав ошибке Допуск А априори (см., например, список литературы [22, 25]). Это привязывает проверку модель / код жестко к конкретному инженерного проекта, а не для менее определенной научно-обоснованной техники (или она не учитывает тот факт, что соглашение может быть приемлемо для одного приложения и не для другого). Не все сравнения должно привести к кода, заданного значения. Ладена назначение подтверждено, потому что некоторый минимальный соглашения должно быть предусмотрено. Общая (и обязательно расплывчато) уровень приемлемого соглашения должно определяться общей практики в данной дисциплине. ⁴ (⁴ Разумеется, неправильного прогнозирования тенденция может быть достаточно, чтобы категорически отвергать модель, то есть не дать ей пройти валидацию.) Результаты моделирования с их неопределенности сравниваются с экспериментов с их неопределенностью, и если разумное соглашение как определено передовые стандарты достигается, то код / модель можно назвать «подтверждена». Это не обязательно означает, что модель будет адекватной для всех приложений. Такое конкретное проекта прошел / не прошел толерантность должны быть отнесены к сертификации [1] или аккредитации. Значение этого прошел / не прошел толерантность имеет тенденцию меняться с течением времени с проектными решениями, требований к продукции, и экономики, хотя объективные результаты самого сравнения проверки имеют более постоянного значения.

В настоящем документе предпочтение, как правило, отдается описаниям, а не жестким определениям. В первом абзаце Предисловия и Введения (раздел 1), валидация представлена следующим образом: «валидация, процесс определения степени, в которой модель дает точное представление о реальном мире с точки зрения целей применения модели». В данном описании используются те же формулировки, что широко распространены в формальном определении (например, в Руководстве AIAA [26] и ASME V & V 10 [22]), которое основано на предыдущая определении из DoD [27], которое содержало еще одну фразу «и связанных с ней данных» после слова «модели».

Несмотря на кажущуюся ясность этого краткого определения, состоящего из одного предложения и простых формулировок, оно, по сути, неоднозначно. Есть по крайней мере три спорных момента: подразумевает ли «степень» критерии приемлемости (пройден/не пройден), как уже говорилось; и подразумевает ли «реальный мир» экспериментальные данные; и является ли «целевое использование» конкретным или общим (даже для тех, кто считает это необходимым). Это дает $2^3 = 8$ возможных интерпретаций одного и того же определения, даже не вдаваясь в рассуждения о том, что подразумевается под «моделью» — то есть, вычислительная, концептуальная, математическая, сильная, слабая. Формальные определения необходимы для контрактных или регулирующих спецификаций, но они не достаточны. Голые определения должны быть расширены, чтобы представить интерпретацию. Подход определение—вычет сам по себе не достаточен. Рекомендации этого документа в том, что

(а) проверка не включает критерии приемлемости, которые отнесены к сертификации или аккредитации или, возможно, еще на один срок, связанной с конкретным проектом.

(б) экспериментальные данные не требуются («Нет экспериментальных данных = нет валидации»).

(с) предлагаемое использование носит весьма общий характер (с конкретными объектами привязки к критериям приемлемости, встроенных в сертификации конкретного проекта, а не валидации). В любом случае, следует отметить, что ни один из этих вариантов не влияет на какие либо процедуры, представленные в

С-10 Числовые калибровки

Калибровка происходит не только в физических экспериментах, но и в моделировании, в большей степени в некоторых проблемных областях. Если значения параметров определяются независимыми экспериментальными измерениями, это не правило, считается калибровкой. В калибровке, как правило, один регулирует параметры моделирования, чтобы минимизировать минимальной квадратичной ошибки между экспериментальными измерениями и модели исходом. Примечательно, что это процедура, посредством которой некоторые из «универсальных» параметров различных моделей RANS турбулентности были определены (например, см. список литературы [28]). Эксперименты, используемые может быть того же типа, экспериментов валидации или могут быть специально разработаны для калибровки (например, см. список литературы [29]). Калибровка входных параметров иногда источником разногласий, в частности, когда многие параметры калибруются (или «настроены») одновременно с некоторыми ограничениями. Какими бы ни были критические замечания определенной калибровки упражнения, калибровочные эксперименты и проверочные эксперименты должны храниться отдельно; иначе проверка просто накликает беду. Этот момент был справедливо подчеркнул для вычислительной механике деформируемого твердого тела в работе [22] и для CFD свободной поверхности потоков в [29]. «Таким образом, калибровка не является валидацией» [22, с. 20].

С-11 Список литературы

- [1] Roache, P. J., *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Hermosa Publishers, Albuquerque, 1998.
- [2] Roache, P. J. (2002), "Code Verification by the Method of Manufactured Solutions," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 114, No. 1, March 2002, pp. 4–10.
- [3] Knupp, P. and Salari, K. (2002), *Verification of Computer Codes in Computational Science and Engineering*, CRC Press, Boca Raton.
- [4] Roache, P. J. (2004), "Building PDE Codes to be Verifiable and Validatable," *Computing in Science and Engineering*, Special Issue on Verification and Validation, September/October 2004, pp. 30–38.
- [5] Pelletier, D. and Roache, P. J., "Verification and Validation of Computational Heat Transfer," Chapter 13 of *Handbook of Numerical Heat Transfer*, Second Edition, W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, and J. Y. Murthy, eds., Wiley, New York, 2006.
- [6] Eca, L. and M. Hoekstra, M. (2006), "On the Influence of the Iterative Error in the Numerical Uncertainty of Ship Viscous Flow Calculations," Proc. 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 17–22 Sept. 2006.
- [7] Eca, L. and M. Hoekstra, M. (2007), "Evaluation of Numerical Error Estimation Based on Grid Refinement Studies with the Method of Manufactured Solutions," Report D72-42, Instituto Superior Tecnico, Lisbon.
- [8] Eca, L., Hoekstra, M., and Roache, P. J. (2005), "Verification of Calculations: an Overview of the Lisbon Workshop," AIAA Paper No. 4728, AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Toronto, June 2005.
- [9] Eca, L., Hoekstra, M., and Roache, P. J. (2007), "Verification of Calculations: an Overview of the Second Lisbon Workshop," AIAA Paper 2007-4089, AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, June 2007.
- [10] Sinclair, G. B., Anaya-Dufresne, M., Meda, G., and Okajima, M. (1997), "Tuned Test Problems for Numerical Methods in Engineering," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 4183–4209.
- [1] Роуч, П. Дж., *Верификация и валидация в вычислительной науке и технике*, издательство Hermosa, Альбукерке, 1998 г.
- [2] Роуч, П. Дж. (2002), «Верификация кода методом производимых решений», *Журнал ASME жидкостей инженерии*, часть 114, № 1, март 2002, стр. 4-10.
- [3] Кнупп, П. и Салари, К. (2002), *Верификация компьютерных кодов в вычислительной науке и технике*, CRC Press, Бока-Ратон.
- [4] Роуч, П. Дж. (2004), «Разработка PDE кодов подлежащих верификации и валидации», *Вычисление в науке и технике*, Специальный выпуск по верификации и валидации, сентябрь/октябрь 2004 г., стр. 30-38.
- [5] Пеллетье, Д. и Роуч, П. Дж., «Верификация и валидация в вычислительном теплообмене», Глава 13 *Справочник по Численному теплообмену*, второе издание, У. Дж. Минковиц, Е. М. Спэрроу и Дж.И. Мурти, ред., Уайли, Нью-Йорк, 2006 г.
- [6] Эка, Л. и М. Хоекстра, М. (2006), «О влиянии итерационного погрешности численного неопределенности расчетов Корабль вязкого течения», *Проц. 26-й симпозиум по военно-морской гидродинамики*, Рим, Италия, 17-22 сентября 2006.
- [7] Эка, Л. и М. Хоекстра, М. (2007), «Оценка численной оценки ошибок на основе исследований детализации сетки с методом производимых решений», *Отчет D72-42, Высшего технического института, Лиссабон*.
- [8] ЭКА, Л., Хоекстра М., Роуч, П. Дж. (2005), «Верификация расчетов: обзор лиссабонского семинара», AIAA документ № 4728, AIAA Конференция по вычислительной гидродинамике, Торонто, июнь 2005 г.
- [9] Эка, Л., Хоекстра М., Роуч, П. Дж. (2007), «Верификация расчетов: Обзор второго лиссабонского семинара» AIAA документ 2007-4089, AIAA Вычислительная гидродинамика конференции, Майами, июнь 2007 г.
- [10] Синклер, Г. Б., Анайя-Дуфресне, М., Меда, Г., Окайима, М. (1997), «Настроенные тестовые задачи для численных методов проектирования» *Международный журнал по численным методам в области инженерии*, часть 40, стр. 4183-4209.

- [11] Sinclair, G. B., Beisheim, J. R., and Sezer, S. (2006), "Practical Convergence-Divergence Checks for Stresses from FEA," Proc. 2006 International ANSYS Users Conference and Exposition, 2–4 May 2006, Pittsburgh, PA, U.S.A. See also Report ME-MS1-08, Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University.
- [12] L. Eca and M. Hoekstra, "An Evaluation of Verification Procedures for Computational Fluid Dynamics," IST Report D72-7, Instituto Superior Tecnico (Lisbon), June 2000.
- [13] L. Eca and M. Hoekstra, "Verification Procedures for Computational Fluid Dynamics On Trial," IST Report D72-14, Instituto Superior Tecnico (Lisbon), July 2002.
- [14] M. Hoekstra and L. Eca, "An Example of Error Quantification of Ship-Related CFD Results," Maritime Research Institute Netherlands, *7th Numerical Ship Hydrodynamics Conference*, Nantes, July 1999.
- [15] M. Hoekstra and L. Eca, "An Example of Error Quantification of Ship-Related CFD Results," Maritime Research Institute Netherlands, 2000.
- [16] M. Hoekstra, L. Eca, J. Windt and H. Raven, "Viscous Flow Calculations for KVLCC2 and KCS Models using the PARNASSOS Code," Proc. Gothenburg 2000, *A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics*, Gothenburg, Sweden.
- [17] L. Eca and M. Hoekstra, "On the Application of Verification Procedures in Computational Fluid Dynamics," *2nd MARNET Workshop*, Maritime Research Institute Netherlands, 2000.
- [18] L. Eca and M. Hoekstra, "An Evaluation of Verification Procedures for CFD Algorithms," *Proc. 24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan, 8–13 July 2002.
- [19] H. C. Raven, M. Hoekstra and L. Eca, "A Discussion of Procedures for CFD Uncertainty Analysis," MARIN Report 17678-1-RD, Maritime Institute of the Netherlands, October 2002. www.marin.nl/publications/pg_resistance.html.
- [20] Roache, P. J. (2003), "Error Bars for CFD," AIAA Paper 2003-0408, AIAA 41st Aerospace Sciences Meeting, January 2003, Reno, Nevada.
- [21] Roache, P. J. (2003), "Conservatism of the GCI in Finite Volume Computations on Steady State Fluid Flow and Heat Transfer," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, No. 4, July 2003, pp. 731, 732.
- [22] ASME Committee PTC 60 (2006), *ANSI Standard V&V 10. ASME Guide on Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, 29 December 2006.
- [23] Helton, J. C., et al. (1995), "Effect of Alternative Conceptual Models in a Preliminary Performance Assessment for the Waste Isolation Pilot Plant," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 154, pp. 251–344.
- [24] Roache, P. J. (1997), "Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Volume 29, pp. 123–160.
- [11] Синклер, Г. Б., Бейшейм, Дж. Р., Сезер, С. (2006), «Практические проверки конвергенции-дивергенции для нагрузок от FEA», Проц. 2006 Международный ANSYS конференция и выставка для пользователей, 2-4 мая 2006 года, Питтсбург, Пенсильвания, США См. также доклад ME-MS1-08, инженерно-механический отдел, Государственный университет Луизианы.
- [12] Л. Эка и М. Хоекстра, «Оценка процедур верификации вычислительной гидродинамики», доклад IST D72-7, Высшего технического института (Лиссабон), июнь 2000 г.
- [13] Л. Эка и М. Хоекстра, «Проверочные процедуры верификации для вычислительной гидродинамики», доклад IST D72-14, Высшего технического института (Лиссабон), июль 2002 г.
- [14] М. Хоекстра и Л. Эка, «Пример количественной оценки ошибки в результатах вычислительной гидродинамики морских судов», Морской научно-исследовательский институт Нидерландов, 7-ая конференция по численной гидродинамик судов, Нант, июль 1999 г.
- [15] М. Хоекстра и Л. Эка, «Пример количественной оценки ошибки в результатах вычислительной гидродинамики морских судов», Морской исследовательский институт Нидерландов, 2000.
- [16] М. Хоекстра, Л. Эка, Дж. Виндт, Г. Ворон, «Расчеты вязкого течения для моделей KVLCC2 и KCS, использующих код PARNASSOS», труды, Гетеборг 2000 г, Семинар по вычислительной гидродинамике морских судов, Гетеборг, Швеция.
- [17] Л. Эка, М. Хоекстра, «О применении процедуры верификации в вычислительной гидродинамике» 2-й семинар MARNET, Морской научно-исследовательский институт Нидерланды, 2000 г.
- [18] Л. Эка, М. Хоекстра, «Оценка процедур верификации для алгоритмов вычислительной гидродинамики» труды 24-го симпозиума по военно-морской гидродинамике, Фукуока, Япония, 8-13 июля 2002 г.
- [19] Х. К. Рейвен, М. Хоекстра, Л. Эка, «Обсуждение процедур вычислительной гидродинамики анализа неопределенности», отчет MARIN 17678-1-RD, Морской институт Нидерландов, октябрь 2002 г. www.marin.nl/publications/pg_resistance.html.
- [20] Роуч, П. Дж. (2003), «Планки погрешностей в вычислительной гидродинамике» AIAA работа 2003-0408, AIAA 41-е совещание по аэрокосмонавтике, январь 2003 г., Рино, Невада.
- [21] Роуч, П. Дж. (2003), «Заниженная оценка GCI в вычислениях конечного объема по стационарной гидродинамике и теплопередаче» Журнал ASME по динамике жидкостей, часть 125, № 4, июль 2003 г., с 731, 732.
- [22] Комитет ASME PTC 60 (2006), Стандарт ANSI по Валидации и верификации 10 ASME *Руководство по верификации и валидации в вычислительной механике твердых тел*, 29 декабря 2006 г.
- [23] Хелтон, Дж. С., и др. (1995), «Воздействие альтернативных концептуальных моделей на предварительную оценку производительности для опытной установки изоляции отходов» Атомная промышленность, часть 154, стр. 251-344.
- [24] Роуч, П. Дж. (1997), «Количественное определение неопределенности в вычислительной гидродинамике», Ежегодный обзор механики жидкостей, часть 29, стр. 123-160.

- [25] Oberkampf, W. L. and Trucano, T. G. (2002), "Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, no. 3, pp. 209–272.
- [26] AIAA, 1998, *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*, AIAA G-077-1998, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA.
- [27] Department of Defense, 1996, *DoD Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, and Accreditation (VV&A)*, DoD Instruction 5000. 61, April 29, 1996. Re-issued 13 May 2003.
- [28] Wilcox, D. C. (2006), *Turbulence Modeling for CFD*, Third Edition, DCW Industries, La Canada, CA.
- [29] ASCE/EWRI (2008), "3D Free Surface Flow Model Verification and Validation," Wang, S. S. Y.; Jia, Y.; Roache, P. J.; Smith, P. E.; and Schmalz, R. A. Jr., eds. ASCE/EWRI Monograph.
- [25] Оберкамф, В. Л., Трукано, Т. Г. (2002), «Валидация и верификация в вычислительной гидродинамике», Развитие в области аэрокосмонавтики, часть 38, номер 3, стр. 209-272.
- [26] AIAA, 1998, *Руководство по валидации и верификации вычислительной моделирования в гидродинамике*, AIAA G-077-1998, Американский институт аэронавтики и астронавтики, Рестон, штат Вирджиния.
- [27] Министерство обороны, 1996, *DoD моделирования (M&S) верификация, валидация и аккредитации (V.V.&A)*, DoD Инструкция 5000. 61, 29 апреля 1996 г. Переиздание 13 мая 2003.
- [28] Уилкоккс, Д. С. (2006), *Моделирование Турбулентности для вычислительной гидродинамики*, третье издание, DCW Industries, Ла-Канада, Калифорния.
- [29] ASCE / EWRI (2008), «Верификация и валидация трехмерной модели потока на свободной поверхности» Ван, S.S.Y.; Цзя, Ю.; Роуч, П. Дж.; Смит, П. Е.; и Шмальц, Р. А. младший, ред. ASCE/EWRI Монография.