

ООО «СИТИС»

**Кафедра «Системы автоматизированного
проектирования объектов строительства»
Строительного Института Уральского
Федерального Университета**

Стандарт организации

Компьютерное моделирование

**Руководство по
выполнению расчетов**

СТО СИТИС-202-16

**Екатеринбург
2016**

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. N 184-ФЗ «О техническом регулировании», а общие правила применения стандартов организаций изложены в ГОСТ Р 1.0-2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения».

Настоящий стандарт организации является документом в области стандартизации и применяется в соответствии с Законом «О техническом регулировании», а также с 01 июня 2016 года в соответствии с Законом «О стандартизации в Российской Федерации»

Сведения о стандарте

1. Название стандарта: «Компьютерное моделирование. Руководство по выполнению расчетов»
2. Обозначение стандарта: СТО СИТИС-202-16
3. РАЗРАБОТАН ООО «СИТИС» совместно с кафедрой «Системы автоматизированного проектирования объектов строительства» Строительного института Уральского Федерального Университета
4. РАССМОТРЕН и одобрен на заседании кафедры САПРОС СИ УрФУ 10.03.2016
5. ПРИНЯТ приказом директора ООО «СИТИС» № С10 от 11.03.2016.
6. ДАТА ВВЕДЕНИЯ 11.03.2016

Общество с ограниченной ответственностью «Ситис»
ОГРН 1026602310206
620028 Екатеринбург, ул. Долорес Ибаррури, 2
www.sitis.ru

Исключительные авторские права на данный стандарт принадлежат ООО «Ситис»
ООО «Ситис» предоставляет всем заинтересованным лицам право бесплатного использования настоящего стандарта, а также воспроизведения настоящего стандарта полностью или частями в печатном и электронном виде.

© ООО «СИТИС», 2016

Содержание

1. Общая часть	4
1.1. Предисловие	4
1.2. Область применения	4
2. Термины и определения	4
2.1. Модели.....	4
2.2. Модели явлений	5
2.3. Модели объектов	5
2.4. Расчеты и моделирование.....	6
2.5. Инженерная оценка	7
2.6. Неопределенность, погрешности, ошибки	7
2.7. Валидация, верификация, аккредитация, калибровка	8
2.8. Компьютерные программы	9
2.9. Отчетная документация	10
3. Сокращения	10
4. Расчеты и моделирование	10
4.1. Общие положения	10
5. Требования к расчетам	10
5.1. Состав и порядок выполнения расчетов	10
5.2. Результат расчета	11
6. Требования к моделированию	11
6.1. Состав и порядок моделирования	11
6.2. Результат моделирования	12
7. Библиография.....	12
8. Приложение 1. Оценка рисков расчетов и моделирования	14
8.1. Общие положения	14
8.2. Последствия решений на основании расчетов.....	14
8.3. Влияние расчетов	14
8.4. Матрица оценки рисков расчетов.....	15
9. Приложение 2. Ранжирование и идентификация явлений.....	16
9.1. Предисловие	16
9.2. Процедура	16
9.3. Оценка важности явлений	16
9.4. Оценка изученности явлений	16
9.5. Уровни ответственности	17
9.6. Таблица идентификации и ранжирования	18
10. Приложение 3. Шкала оценки достоверности	19
10.1. Предисловие.....	19
10.2. Введение.....	19
10.3. Обзор факторов, подфакторов и категорий достоверности	19
10.4. Определения уровней	22
10.5. Процессы формирования сводки оценки достоверности.....	27
10.6. Сравнение с пороговыми значениями достаточности.....	29
11. Приложение 4. Верификация численного решения	31
11.1. Предисловие.....	31
11.2. Процедура оценки погрешности	31
11.3. Коэффициент надежности	32
12. Приложение 5. Представление неопределенностей расчета	34
12.1. Предисловие.....	34
12.2. Валидационные метрики	34
12.3. Области валидации и верификации.....	35
13. Приложение 6. Контрольные вопросы к программному обеспечению	37
13.1. Математическая модель	37
13.2. Документация программного обеспечения.....	37

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1. Предисловие

- 1.1.1. В настоящем стандарте приведена последовательность операций при выполнении расчетов с использованием компьютерных моделей физических объектов и систем.
- 1.1.2. При разработке стандарта были рассмотрены и обобщены положения стандартов по компьютерному моделированию в разных предметных областях:
 - 1.1.2.1. Компьютерное моделирование и расчеты – NASA-STD-7009 [7.1.4], NASA-HDBK-7009 [7.1.5], NAFEMS QSS 001 [7.1.10], NAFEMS SAFESA [7.1.12], MIL-STD-3022 [7.1.26]
 - 1.1.2.2. Механика твердого тела – ASME V&V 10-2006 [7.1.1], ASME V&V 10.1-2012 [7.1.2]
 - 1.1.2.3. Вычислительная гидродинамика – AIAA G-077-1998 [7.1.8], ASME V&V 20-2009 [7.1.3], ITTC-7.5-03 [7.1.9]
 - 1.1.2.4. Пожарная безопасность - ISO 23932:2009 [7.1.6], ISO 16730-1:2015 [7.1.7]

1.2. Область применения

- 1.2.1. Настоящий стандарт устанавливает состав и порядок выполнения расчетов реальных объектов и физических систем с использованием компьютерного моделирования, термины и определения основных понятий, классификацию расчетов, моделей и типов компьютерных программ для моделирования.
- 1.2.2. Применение стандарта является добровольным
- 1.2.3. Целью разработки данного стандарта является:
 - 1.2.3.1. Определение в отечественном документе в области стандартизации терминов и определений в области компьютерного моделирования, отсутствующих в отечественных региональных и национальных стандартах (ГОСТ и ГОСТ Р), а также стандартах и методических руководствах инженерных обществ и объединений
 - 1.2.3.2. Уточнение широко используемого понятия «модель» - введение подразделения общего понятия «модель» на «модель явления» и «модель объекта»
 - 1.2.3.3. Уточнение широко используемого в технической документации к программному обеспечению для компьютерного моделирования понятия «решатель», соотнесение содержания этого термина и производных понятий с терминологией моделей и моделирования и терминологией программного обеспечения.
 - 1.2.3.4. Уточнение значений терминов «расчет» и «моделирование»
 - 1.2.3.5. Классификация расчетов в зависимости от ответственности и степени риска
 - 1.2.3.6. Описание методологии выполнения работ по расчетам и моделированию физических систем
- 1.2.4. Стандарт может применяться:
 - 1.2.4.1. При классификации программ для компьютерного моделирования
 - 1.2.4.2. При классификации компьютерных моделей
 - 1.2.4.3. При составлении отчетной документации по результатам расчетов и моделирования
 - 1.2.4.4. При составлении технической документации о валидации моделей
 - 1.2.4.5. При составлении технической документации к компьютерным программам для численного моделирования
 - 1.2.4.6. При использовании в качестве ссылочного документа при разработке стандартов, руководств, методических рекомендаций и других подобных документов в области компьютерного моделирования и расчетов в различных предметных областях
 - 1.2.4.7. При составлении учебных программ и учебных планов по дисциплинам в области компьютерного моделирования

2. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2.1. Модели

- 2.1.1. **модель (model)** – описание или представление системы, объекта, явления или процесса. [NASA-STD-7009, 3.2, 17]
- 2.1.2. **концептуальная модель (conceptual model)**: набор предположений и описаний физических процессов, представляющих поведение рассматриваемой реальности, на основании которых могут быть построены математические модели или валидационные эксперименты. [NASA-STD-7009, 3.2, 7]
- 2.1.3. **математическая модель (mathematical model)**: математические уравнения, граничные значения, начальные условия, и исходные данные, необходимые для описания концептуальной модели. [ASME VV10, Приложение 1, 15]
- 2.1.4. **вычислительная модель (computational model)**: численная реализация математической модели. [NASA-STD-7009, 3.2, 6]
- 2.1.5. **иерархия моделей** – соотношение различных моделей одного и того же реального объекта (явления) между собой в зависимости от степени детализации представления объекта (явления), точности и достоверности определения рассматриваемых свойств объекта (явления).
- 2.1.6. **стек (вложенность) моделей** – иерархия моделей объекта для решения практической задачи, в которой происходит последовательное увеличение точности (уменьшение неопределенности) определения исследуемых свойств объекта.
- 2.1.7. **дискретизация** – представление непрерывных функций в виде их дискретного аналога
- 2.1.8. **дискретный** – состоящий из отдельных частей, прерывистый, дробный.

2.2. Модели явлений

- 2.2.1. **Явление (phenomena)** – физический процесс, который влияет на интересующую реакцию рассматриваемой физической системы
- 2.2.2. **концептуальная модель явления** - набор предположений и описаний физических процессов, представляющих поведение рассматриваемой реальности [NASA-STD-7009, 3.2, 7]
- 2.2.3. **математическая модель явления** - математические уравнения, граничные значения, начальные условия, необходимые для описания концептуальной модели явления. [по типу ASME VV10, Приложение 1, 15]
- 2.2.4. **вычислительная модель явления** - реализация численным методом решения уравнений математической модели явления. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 6]

2.3. Модели объектов

- 2.3.1. **объект** - реальные условия и сценарии состояния рассматриваемой системы [по типу ASME VV10, Приложение 1, 16]
- 2.3.2. **модель объекта (object model)**: концептуальные, математические и численные представления физических явлений, необходимых для представления конкретных реальных условий и сценариев. Таким образом, модель как правило включает в себя геометрическое представление, определяющие уравнения, граничные и начальные условия, нагрузки, модели и связанные с ними параметры материала, пространственные и временные приближения и численные алгоритмы решения. [по типу ASME VV10, Приложение 1, 16]
- 2.3.3. **концептуальная модель объекта** - набор предположений и описаний физических процессов, и предположений и описаний свойств рассматриваемой физической системы. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 7]
- 2.3.4. **математическая модель объекта** - необходимые математические уравнения, граничные значения, начальные условия и исходные данные для описания концептуальной модели объекта. [ASME VV10, Приложение 1, 15]
- 2.3.5. **вычислительная модель объекта** - численные представления физических явлений и исходных данных, необходимых для представления конкретных реальных объектов, условий и сценариев. Численная модель объекта как правило включает в себя геометрическое представление, определяющие уравнения, граничные и начальные условия, нагрузки, модели и связанные с ними параметры материала, пространственные и временные приближения и численные алгоритмы решения и их параметры. [по типу ASME VV10, Приложение 1, 16]
- 2.3.6. **исходные данные** – набор параметров, описывающих модель объекта, математические зависимости и численные методы решения, свойства среды и материалов, начальные и граничные условия, другие подобные параметры
- 2.3.7. **справочные данные** – данные о физических константах, свойствах веществ, материалов и явлений, представленных в числовом или аналитическом виде.

- 2.3.8. **домен (domen)** – область пространства, выбранная для выполнения моделирования рассматриваемого явления и представления геометрической формы рассматриваемого объекта
- 2.3.9. **сетка (mesh)** – дискретное представление домена
- 2.3.10. **Период** – условный период времени, выбранный для моделирования рассматриваемого явления и объекта
- 2.3.11. **Временная последовательность** – дискретное представление периода времени моделирования
- 2.3.12. **Метамодель** – вычислительная модель объекта, состоящая из вычислительной модели явления, и представления пространства и времени объекта доменом и периодом моделирования. Конкретное дискретное представление (разбиение) домена и периода моделирования выполняется компьютерной программой.
- 2.3.13. **Квазимодель** - вычислительная модель объекта, состоящая из группы вычислительных моделей явлений, и дискретного представления пространства и времени. Выбор вычислительной модели явления для моделирования выполняется компьютерной программой.
- 2.3.14. **Экзомодель** - вычислительная модель объекта, состоящая из группы вычислительных моделей явлений, и представления пространства и времени для рассматриваемого объекта в виде домена и периода моделирования. Выбор вычислительной модели явления для моделирования, а также дискретизация домена и периода моделирования выполняются компьютерной программой.

2.4. Расчеты и моделирование

- 2.4.1. **расчет (simulation)** – имитация свойств системы, объекта, явления или процесса с использованием вычислительной модели, и инженерная оценка полученных результатов. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 22]
- 2.4.2. **моделирование (modeling)** - процесс создания и модификации вычислительной модели. [AIAA G-007-1998, 2.1, 2]
- 2.4.3. **вычисление (выполнение) модели (running model, model calculations)** - выполнение компьютерных вычислений с использованием вычислительной модели. Данное определение отличается от «расчета» отсутствием инженерной оценки результатов выполненных вычислений
- 2.4.4. **рассматриваемая реальность (reality of interest)**: физическая система и связанная с ней среда, к которой будет применена вычислительная модель. [ASME VV10, Приложение 1, 21]
- 2.4.5. **предполагаемое использование (intended use)**: конкретная цель, для которой будет использоваться вычислительная модель. [ASME VV10, Приложение 1, 13]
- 2.4.6. **прогноз (prediction)**: выходные данные модели, которые вычисляют отклик физической системы до получения пользователем экспериментальных данных. [ASME VV10, Приложение 1, 20]
- 2.4.7. **расчетные свойства (simulation outcomes)** – интересующие характеристики, полученные в результате моделирования, которые будут использоваться, наряду с оценками неопределенности для сравнения в целях валидации. [ASME VV10, Приложение 1, 25]
- 2.4.8. **результаты расчета (simulation results)**: выходные данные, полученные при использовании вычислительной модели. [ASME VV10, Приложение 1, 26]
- 2.4.9. **обновление модели (model update)** - процесс изменения основных предположений, структуры, оценки параметров, граничных условий или начальных условий модели с целью повышения точности модели. [ASME VV10, Приложение 1, 17]
- 2.4.10. **абстрагирование (abstraction)** – процесс выбора основных аспектов рассматриваемой системы, которые будут представлены в расчете или моделировании, при котором игнорируются аспекты, не относящиеся к цели расчета или моделирования. [NASA-STD-7009, 3.2, 1]
- 2.4.11. **точность (accuracy)** – оценка разницы между параметром или полученным значением (или набором параметров или полученных значений) в рамках расчета, моделирования или эксперимента, и истинным значением или предполагаемым истинным значением. Чем меньше указанная разница, тем выше точность [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 2]
- 2.4.12. **погрешность** – разница между параметром или полученным значением (или набором параметров или полученных значений) в рамках расчета, моделирования или эксперимента, и истинным значением или предполагаемым истинным значением. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 2]

- 2.4.13. **анализ (analysis)** – любая последующая обработка или интерпретация отдельных значений, массивов, файлов данных, а также наборов операций в результате моделирования. [NASA-STD-7009, 3.2, 3]
- 2.4.14. **достоверность (credibility)** – качество, характеризующее доверие или убежденность в результатах расчета и моделирования. [NASA-STD-7009, 3.2, 9]
- 2.4.15. **эмуляция (emulation)** – использование расчета и моделирования для имитации другой системы, таким образом, что данный расчет и моделирование ведут себя так же, как другая система, или представляется ей. [NASA-STD-7009, 3.2, 11]
- 2.4.16. **границы использования (limits of operation)** – граничное значение набора параметров, для которого результат расчета и моделирования является приемлемым на основе требуемых результатов работы по верификации, валидации и исчислению неопределенности. [NASA-STD-7009, 3.2, 14]
- 2.4.17. **анализ чувствительности (sensitivity analysis)** – изучение того, как изменения (вариация) в результатах моделирования зависят от изменений (вариации) в исходных данных и параметрах модели. [NASA-STD-7009, 3.2, 20]
- 2.4.18. **эксперт в предметной области (subject matter expert)** – специалист, имеющий образование, подготовку или опыт работы в конкретной технической или управленческой области, который выполняет экспертные оценки при выполнении расчетов и моделировании. [NASA-STD-7009, 3.2, 23]

2.5. Инженерная оценка

- 2.5.1. **Инженерная оценка (engineering judgement)** – процесс дополнения, принятия или отклонения элементов расчета и/или другого инженерного анализа специалистом или группой специалистов, на основании образования, опыта и признанной квалификации. [ISO 23932-2009, 3.1]
- 2.5.2. **таблица идентификация явлений и ранжирования (ТИЯР) (phenomena identification and ranking table, PIRT)**: перечень физических процессов, которые влияют на интересующие отклики системы, наряду с ранжированием значимости каждого процесса. [ASME VV10, Приложение 1, 19]
- 2.5.3. **Расчетный сценарий** – расчетная ситуация, для которой выполняется моделирование значимых (существенных) для выполняемого расчета явлений и процессов
- 2.5.4. **достаточность (adequacy)**: состояние, удовлетворяющее всем требованиям для принятия модели, в том числе для точности модели и для программных ограничений, таких как реализации, стоимости, технического обслуживания и простоты использования. [ASME VV10, Приложение 1, 1]

2.6. Неопределенность, погрешности, ошибки

- 2.6.1. **неопределенность (uncertainty)**: потенциальная неточность в любой фазе или деятельности моделирования, расчета, или процесса экспериментирования, что связано с естественной изменчивостью или отсутствием знаний. [ASME VV10, Приложение 1, 27]
- 2.6.2. **неопределенность (uncertainty)** – широкий и общий термин, используемый для описания несовершенного уровня знаний или изменчивости в результате целого ряда факторов, включая, но не ограничиваясь, отсутствие знаний, применимости информации, физической изменчивости, случайности или стохастического поведения, оценок и приближений. [NASA-STD-7009, 3.2, 25]
- 2.6.3. **количественная неопределенность (uncertainty quantification)** – процесс выявления всех соответствующих источников неопределенностей, характеризуя их во всех моделях, экспериментов, и сопоставления результатов и экспериментов, и в количественной оценке неопределенности на всех соответствующих входах и выходах моделирования или эксперимента моделей и моделирования. [NASA-STD-7009, 3.2, 26]
- 2.6.4. **исчисление неопределенности (uncertainty quantification)** - процесс характеристики всех неопределенностей модели или эксперимента и количественного определения их влияния на моделирование или экспериментальные результаты. [ASME VV10, Приложение 1, 28]
- 2.6.5. **ошибка (error)** - опознаваемая неточность в каком-либо этапе или процессе моделирования или экспериментов, не связанная с недостатком знаний (например, выбором неправильной характеристики материала для использования в вычислительной модели, запись неправильного показания во время калибровки датчика, неправильно определение оператора в исходном коде программы). [ASME VV10, Приложение 1, 9]

- 2.6.6. **неснижаемая неопределенность (irreducible uncertainty):** присущая изменчивость, связанная с моделируемой физической системой. Также называется "неконтролируемой неопределенностью". Например, предел текучести стали в производственной партии балок следующим образом распределение вероятностей. С многих наблюдений, это распределение может быть определена, но она не может быть устранена. [ASME VV10, Приложение 1, 14]
- 2.6.7. **снижаемая неопределенность (reducible uncertainty):** потенциальный недостаток, который может быть уменьшен путем сбора большего количества данных, наблюдений, или информацию. [ASME VV10, Приложение 1, 22]
- 2.6.8. **коэффициент безопасности (safety factor)** – коэффициент, на который умножаются рассчитанные значения для компенсации неопределенности в методах, расчетах, входных данных и предположениях [ISO 23932-2009, 3.8]
- 2.6.9. **сходимость (convergence)** - изменение (уменьшение, увеличение) при моделировании ошибки или разницы в полученных результатах при определении интересующей величины в зависимости от параметров дискретизации и параметров численного метода.
- 2.6.10. **Итерационная сходимость (iteration convergence)** – сходимость при изменении параметров итерационного численного метода
- 2.6.11. **Сходимость дискретизации (grid convergence, discretization convergence)** – сходимость при изменении степени дискретизации модели
- 2.6.12. **формальный порядок точности (formal order of accuracy):** значения показателей ведущих членов разложения в степенной ряд погрешности, вызванной усечением при дискретизации уравнений в частных производных. Это теоретическая скорость сходимости метода дискретизации в пространстве и во времени. [ASME VV10, Приложение 1, 12]
- 2.6.13. **наблюдаемый порядок точности (сходимости) (observed order of accuracy (convergence)):** полученная опытным путем скорость сходимости решения набора дискретных уравнений при стремлении пространственной и временной дискретизации к нулю. Эта скорость может быть получена путем сравнения нескольких вычислительных результатов решения, использующие различные уровни дискретизации. [ASME VV10, Приложение 1, 18]

2.7. Валидация, верификация, аккредитация, калибровка

- 2.7.1. **валидация (validation)** - процесс определения, в какой степени модель явления или объекта является представлением реального явления или объекта с точки зрения предполагаемого использования модели или выполнения расчета, когда применяется ко всему классу задач, рассматриваемых в модели явления или модели объекта. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 27 и ISO 23932-2009, 3.11]
- 2.7.2. **валидировано (validated)** - посредством валидации и верификации модель может быть охарактеризована как "валидированная для предполагаемого использования по назначению", как только она соответствует требованиям по валидации. [ASME VV10, Приложение 1, 29]
- 2.7.3. **валидационные требования (validation requirements):** характеристики и ожидания, которым должна соответствовать вычислительная модель, чтобы использоваться по назначению. Эти требования устанавливаются в плане валидации и верификации и часто включают в себя описания конкретных испытаний, которые необходимо провести или прочих оценок, которые необходимо собрать, а также уточнений по соответствию результатов моделирования результатам экспериментов или оценок. [ASME VV10, Приложение 1, 33]
- 2.7.4. **верификация решателя (code verification)** - процесс определения того, что компьютерная программа, реализующая вычислительную модель явления, с достаточной для рассматриваемой задачи точностью представляет математическую модель и численные метод её решения. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 28]
- 2.7.5. **верификация расчета (simulation verification)** - процесс определения того, что результаты, полученные при расчете или моделировании, с достаточной для рассматриваемой задачи точностью представляют реальный объект [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 28]
- 2.7.6. **верификация вычислений (calculation verification)** - процесс определения правильности (точности) результатов вычислений [ASME VV10, Приложение 1, 2]
- 2.7.7. **аккредитация (accreditation)** – официальное подтверждение что модель, расчет или группа моделей или расчетов, и соответствующие использованные данные, применимы для оговоренных целей использования [MIL-STD-3022, 3.1.2]
- 2.7.8. **калибровка (calibration)** – процесс уточнения параметров численного метода решения или параметров математической модели с целью улучшить соответствие модели с референтом. [NASA-STD-7009, 3.2, 5]

- 2.7.9. **референс (reference)** - данные, теория или информация, с которыми должны быть сопоставлены результаты моделирования. [ASME VV10, Приложение 1, 23]
- 2.7.10. **валидационный эксперимент (validation experiment)** - эксперимент, разработанный и производимый для получения данных с целью валидации модели. [ASME VV10, Приложение 1, 31]
- 2.7.11. **валидационная метрика (validation metric)**: математическая мера, которая дает количественную оценку уровня соответствия результатов моделирования результатам экспериментов. [ASME VV10, Приложение 1, 32]
- 2.7.12. **экспериментальные данные (experimental data)**: необработанные или обработанные наблюдения (измерения), полученные при проведении эксперимента. [ASME VV10, Приложение 1, 10]
- 2.7.13. **экспериментальные результаты (experimental outcomes)**: характеристики, полученные из экспериментальных данных, которые будут использоваться, наряду с оценкой неопределенности, для сравнения в целях валидации. [ASME VV10, Приложение 1, 11]
- 2.7.14. **область валидации** – область пространства параметров моделей объектов, для которой с достаточной достоверностью возможно определить значение валидационных метрик для оценки прогнозирующей способности моделирования рассматриваемого объекта. Область валидации строится вокруг отдельных точек и групп точек, для которых определены валидационные метрики
- 2.7.15. **область верификации** – область пространства параметров моделей объектов, для которой с достаточной достоверностью возможно определить значение погрешности численного метода для оценки прогнозирующей способности моделирования рассматриваемого объекта. Область валидации строится вокруг отдельных точек и групп точек, для которых определена погрешность численного метода
- 2.7.16. **верификационное испытание** – выполнение серии вычислений для одной вычислительной модели с различными параметрами дискретизации и параметрами численных методов, для определения погрешности численного метода
- 2.7.17. **формальный порядок сходимости** – степень полинома, описывающего зависимость погрешности от степени дискретизации, определенная аналитически для уравнений математической модели объекта.
- 2.7.18. **наблюдаемый порядок сходимости** - степень полинома, описывающего зависимость погрешности от степени дискретизации, определенный для серии расчетов модели с разной степенью дискретизации.

2.8. Компьютерные программы

- 2.8.1. **программа (code)** - компьютерная реализация алгоритмов, разработанных для обеспечения описания и приближенного решения класса задач. [ASME VV10, Приложение 1, 5]
- 2.8.2. **решатель (solver)** – программа, реализующая одним численным методом решение математических уравнений и зависимостей, соответствующих одной концептуальной модели явления.
- 2.8.3. **комплексный (пакетный) решатель** – программа, реализующая одну или несколько математических моделей явлений одним или несколькими численными методами
- 2.8.4. **экзорешатель** – программа, реализующая алгоритм, автоматически или по заданию пользователя выбирающий математическую модель и решатель для заданной концептуальной модели, или выбирающий численный метод для решения уравнений заданной математической модели
- 2.8.5. **метарешатель** – программа, реализующая одним численным методом решение математических уравнений и зависимостей, соответствующих одной концептуальной модели явления, и сеточный препроцессор для создания исходных данных.
- 2.8.6. **проторешатель** – программа, или пакет прикладных программ, реализующие несколько отдельных решателей и/или экзорешателей, которые задаются (выбираются) пользователем для выполнения расчета
- 2.8.7. **суперрешатель** – программа или пакет прикладных программ, реализующий моделирование нескольких явлений в отдельных представлениях пространства для каждого явления, и обеспечивающий для каждого рассматриваемого явления автоматический обмен данными моделирования между решателями в заданные моменты времени.
- 2.8.8. **препроцессор (preprocessor)** - программа, выполняющая действия по подготовке данных для последующей обработки решателями

- 2.8.9. **постпроцессор (postprocessor)** – программа, выполняющая документирование, визуализацию, обработку и другую подобную интерпретацию результатов численного моделирования, выполненного решателями
- 2.8.10. **контроллер моделирования** – программа, выполняющая действия по подготовке исходных данных для нового моделирования на основании анализа результатов выполненного ранее моделирования
- 2.8.11. **интегрированная среда моделирования** – программа или пакет прикладных программ, имеющая в своем составе один или несколько препроцессоров, процессоров и решателей
- 2.8.12. **входные данные** – исходные и справочные данные для рассматриваемой модели на машиночитаемом носителе и параметры расчета, предназначенные для описания выполнения расчета компьютерной программой, закодированные в формате описания данных этой компьютерной программы
- 2.8.13. **выходные данные** – данные, содержащие результаты выполненного моделирования
- 2.8.14. **справочная база данных** – база справочных данных в машиночитаемой памяти

2.9. Отчетная документация

- 2.9.1. **отчет** – бумажный или цифровой документ, подготовленный и надлежащим образом оформленный исполнителем расчета, являющийся результатом работы по расчету и моделированию, и содержащий мнение исполнителя по выполненным работам. Отчет может содержать одну или несколько распечаток. Отчет может быть распечаткой, завизированной исполнителем.
- 2.9.2. **выдача (распечатка)** – бумажный документ, цифровой образ печатного документа или файл в формате текстового редактора, являющиеся результатом работы программы

3. СОКРАЩЕНИЯ

- 3.1.1. **ТИЯР** – таблица идентификации явлений и их ранжирования. (PIRT – Phenomena Identification and ranking Table)
- 3.1.2. **ШОД** – шкала оценки соответствия
- 3.1.3. **ИСС** – индекс сходимости сетки (GCI – Grid Convergence Index)

4. РАСЧЕТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

4.1. Общие положения

- 4.1.1. Расчет как правило является составной частью более общей работы, использующей результаты расчета и моделирования для решения какой-либо практической задачи на основе прогноза, полученного при моделировании, с учетом неопределенности исходных данных, неопределенности и погрешности моделирования.
- 4.1.2. Расчет с применением моделирования (далее – расчет) выполняется специалистом (группой специалистов), имеющим необходимый опыт и квалификацию как в предметной области расчета, так и в области использования численных методов, в зависимости от ответственности решаемой задачи.
- 4.1.3. Моделирование в составе расчета может выполняться специалистами, не имеющими опыта или квалификации в предметной области расчета. В этом случае моделирование выполняется под руководством специалиста, выполняющего расчет.
- 4.1.4. Объем работ, выполняемых при расчете, определяется в зависимости от важности расчета и оценки рисков расчета.
- 4.1.5. Объем работ расчета определяется специалистом, выполняющими расчет и/или лицами, использующими результаты расчета

5. ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТАМ

5.1. Состав и порядок выполнения расчетов

- 5.1.1. Оценка ответственности расчета и его рисков. При оценке ответственности расчета рекомендуется использовать классификацию, приведенную в приложении 1 или другую подобную методику
- 5.1.2. Оценка полноты и достоверности исходных данных для расчета, оценку их неопределенности и погрешности
- 5.1.3. Оценка полноты и достоверности используемых справочных данных для расчета, оценку их неопределенности и погрешности
- 5.1.4. Разработка расчетной ситуации (сценария)
- 5.1.5. Идентификация и ранжирование явлений для сценария. При идентификации и ранжировании явлений рекомендуется использовать методологию, приведенную в приложении 2 или другую подобную методику
- 5.1.6. Выбор концептуальных и математических моделей и программного обеспечение
- 5.1.7. Составление перечня допущений и упрощений для выбранных моделей
- 5.1.8. Оценка требуемой точности (максимальной погрешности) численного моделирования
- 5.1.9. Выполнение моделирования
- 5.1.10. На основе анализа результатов моделирования, как правило анализа чувствительности моделирования к исходным данным, выполнение уточнения идентификации и ранжирования явлений для сценариев. При необходимости выполнение уточненного моделирования
- 5.1.11. Определение коэффициентов надежности для результатов моделирования
- 5.1.12. Оценка достоверности и точности результатов моделирования. При оценке достоверности возможно использовать методику, приведенную в приложении 3, или использовать другую подобную классификацию или методику.
- 5.1.13. Инженерная оценка результатов моделирования
- 5.1.14. Составление вывода (заключения) по расчету

5.2. Результат расчета

- 5.2.1. Результатом расчета являются
 - 5.2.1.1. Отчетная документация по выполненному расчету
 - 5.2.1.2. Вывод по расчету,
- 5.2.2. Результатом расчета может являться верифицированная вычислительная модель объекта
- 5.2.3. В отчетной документации к расчету приводятся сведения:
 - 5.2.3.1. Оценка ответственности расчета и её классификация.
 - 5.2.3.2. Обоснование выбора концептуальных и математических моделей для выполнения расчета
 - 5.2.3.3. Описание результатов моделирования
 - 5.2.3.4. Оценка достоверности результатов моделирования
 - 5.2.3.5. Назначение коэффициентов надежности при использовании результатов моделирования.

6. ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

6.1. Состав и порядок моделирования

- 6.1.1. Подготовка входных данных для выбранного решателя с описанием вычислительной модели рассматриваемого объекта
- 6.1.2. Выполнение нескольких расчетов (прогонов) модели с различными параметрами дискретизации пространства и времени и параметрами численного метода
- 6.1.3. Верификация моделирования – оценка погрешности (неопределенности) выполненных вычислений. Возможно использование метода индекса сходимости сетки, приведенного в приложении 4 или другой методики
- 6.1.4. Определение или оценка валидационных метрик рассчитанной модели объекта для рассматриваемых (рассчитываемых) параметров с использованием референтов экспериментальных или справочных данных

6.2. Результат моделирования

- 6.2.1. В отчетной документации по моделированию приводятся сведения по валидации использованных моделей явлений и объектов (концептуальных, математических, вычислительных):
- 6.2.1.1. описание валидационных метрик, референты и наборы данных, используемые для проверки моделей.
 - 6.2.1.2. Количественная оценка неопределенности референтных данных
 - 6.2.1.3. Количественная оценка неопределенности исходных данных и параметров модели.
 - 6.2.1.4. Количественная оценка неопределенности результатов моделей и моделирования.
 - 6.2.1.5. Распределение неопределенностей.
 - 6.2.1.6. Величины, полученные из результатов моделей и моделирования.
 - 6.2.1.7. степень и результаты анализа чувствительности моделей к исходным данным
- 6.2.2. В отчетной документации по моделированию приводятся сведения по верификации вычислительных моделей объекта:
- 6.2.3. методы проверки, используемые и любой домен проверки (например, условия, при которых была проведена верификации).
 - 6.2.4. должен документировать любые численные оценки погрешности (например, численные приближения, недостаточно дискретизации, недостаточно итераций, конечная точности арифметических) для результатов расчетной модели.

7. БИБЛИОГРАФИЯ

- 7.1.1. ASME VV 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics (Руководство по верификации и валидации в вычислительной механике твердых тел)
- 7.1.2. ASME VV 10.1-2012 An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics (Пояснение принципов верификации и валидации в вычислительной механике твердых тел)
- 7.1.3. ASME VV 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer (Стандарт по верификации и валидации в вычислительной гидродинамике и теплообмене)
- 7.1.4. NASA-STD-7009 Standard for Models and Simulations (Стандарт по выполнению расчетов и моделирования)
- 7.1.5. NASA-HDBK-7009 Handbook for Models and Simulations: An Implementation Guide for NASA-STD-7009 (Руководство по выполнению расчетов и моделирования: Руководство по внедрению NASA-STD-7009)
- 7.1.6. ISO 23932:2009 Fire Safety Engineering – General Principles (Пожарно-технический анализ – Общие принципы)
- 7.1.7. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering — Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods — Part 1: General (Пожарно-технический анализ – Процедуры и требования к верификации и валидации методов расчета – 1 Общие принципы)
- 7.1.8. AIAA G-077-1998 (2002) Guide for Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (Руководство по верификации и валидации моделей в вычислительной гидродинамике)
- 7.1.9. ITTC-7.5-03 Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures (Анализ неопределенности в вычислительной гидродинамике, верификация и валидация)
- 7.1.10. NAFEMS QSS 001 Engineering simulation. Quality management systems. Requirements. NAFEMS, 2007 (Инженерное моделирование. Системы менеджмента качества. Требования)
- 7.1.11. SAFESA Management guidelines to structural qualification supported by finite element analysis. NAFEMS, 2005 (Руководство по оценке конструкций с помощью анализа методом конечных элементов)
- 7.1.12. SAFESA Technical Manual, NAFEMS, 2005 (Техническое руководство)
- 7.1.13. Roach, P. "Verification and Validation in computational science and engineering", 1998 (Роч, П. «Верификация и валидация в вычислительной науке и технике»)
- 7.1.14. Banks, J "Handbook of simulation", 1998 (Бэнкс, Дж. «Руководство по моделированию»)
- 7.1.15. Roach, P. "Fundamentals of Verification and Validation", 2009 (Роч, П. «Основы верификации и валидации»)

- 7.1.16. Oberkampf, W. L. et al. Verification and Validation in Scientific Computing, 2010 (Оберкамф, В. Л. и др. «Верификация и валидация в научных расчетах»)
- 7.1.17. Velten, K. "Mathematical modeling and simulation: Introduction for Scientists and Engineers", 2010 (Велтен, К. «Математический расчет и моделирование: Введение для научных сотрудников и инженеров»)
- 7.1.18. Cooke, R.M. (1991). Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science. New York: Oxford University Press. (Кук, Р.М. «Эксперты по неопределенности: Точка зрения и субъективная неопределенность в науке»)
- 7.1.19. 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. (Челик, И.Б. и др., «Процедура оценки и представления отчета о неопределенности, связанной с дискретизацией в применении вычислительной гидродинамики»)
- 7.1.20. Salas, M. D. (2006), "Some Observations on Grid Convergence," Computers and Fluids, Vol. 75, No. 7, Aug. 2006, pp. 688-692. (Салас, М.Д., «Некоторые наблюдения по сходимости сетки»)
- 7.1.21. Ega, L. and Hoekstra, M. (2002), "An Evaluation of Verification Procedures for CFD Applications," 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Ja-pan, 8-13 July 2002. (Ига, Л. и Хоекстра, М., «Оценка процедур верификации для применения в вычислительной гидродинамике»)
- 7.1.22. 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. (Ига, Л., Хоекстра, М., Роч, Р.Дж. «Верфикация расчетов: Обзор лиссабонского семинара»)
- 7.1.23. 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. (Ига, Л., Хоекстра, М., Роч, Р.Дж. «Верфикация расчетов: Обзор второго лиссабонского семинара»)
- 7.1.24. 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. (Роч, П. Дж., «Метод представления единой отчетности исследований по измельчению сетки»)
- 7.1.25. NUREG/CR-6978 SAND2008-3997P A Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) Exercise for Nuclear Power Plant Fire Modeling Applications (Пример идентификации и ранжирования явлений (ТИЯР) для моделирования пожаров на ядерных энергетических установках)
- 7.1.26. MIL-STD-3022 Documentation on verification, validation and accreditation (VV&A) for models and simulations, DoD, 2008 (Документирование валидации, верификации и аккредитации для моделей и расчетов, Министерство обороны США, 2008))

8. ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОЦЕНКА РИСКОВ РАСЧЕТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

8.1. Общие положения

8.1.1. Определение того, какие расчеты и моделирование входят в рамки данного приложения должно основываться на оценке риска, связанного с потенциальным использованием расчетов и моделирования. Такие оценки риска расчетов и моделирования учитывают (1) последствия для безопасности жизни людей или критерии успеха задачи, если решение оказывается неверным, и (2) степень, в которой результаты расчетов и моделирования влияют на решение. В данном приложении приводится пример матрицы оценки риска расчетов и моделирования для поддержки этого определения. Программа и проекты безусловно могут адаптировать это для своих конкретных определений последствий (и количества уровней последствий).

8.2. Последствия решений на основании расчетов

8.2.1. Классификации последствий дают оценку последствий решения, оказавшегося неверным.

- 8.2.1.1. **Класс 4 - Незначительные.** Неверное решение может привести к необходимости внесения незначительных изменений, но не может существенно отразиться на безопасности или здоровье людей; повреждение сооружений, оборудования или аппаратных средств обеспечения полета превышает уровень нормального износа; смещение внутреннего графика не влияет на внутренний промежуточные сроки развития; перерасход составляет менее 2 процентов от плановой стоимости; все критерии успеха миссии выполнены с незначительным снижением производительности.
- 8.2.1.2. **Класс 3 - Умеренные.** Неверное решение может привести к травме или профессиональному заболеванию или значительным повреждениям объектов, систем, оборудования или аппаратных средств обеспечения полета; смещение внутреннего графика не влияет на дату запуска; перерасход составляет от 2 процентов, но не более 15 процентов от плановой стоимости; критерии успеха миссии частично (до 25 процентов) не были выполнены в связи со снижением производительности.
- 8.2.1.3. **Класс 2 - Критические.** Неверное решение может привести к серьезной травме или профессиональному заболеванию или крупному имущественному ущербу для сооружений, систем, оборудования или аппаратных средств обеспечения полета; смещение внутреннего графика вынуждает отложить дату запуска; перерасход составляет от 15 процентов, но не более 50 процентов от плановой стоимости; многие критерии успеха миссии (между 25 процентами и 75 процентами) не были выполнены в связи с существенным снижением производительности.
- 8.2.1.4. **Класс 1 - Катастрофические.** Неверное решение может привести к смерти или травме с постоянной потерей трудоспособности, уничтожение объекта при ударе о землю или потеря экипажа, основных систем или борта во время миссии; смещение внутреннего графика вынуждает пропустить окно запуска; перерасход превышает 50 процентов от плановой стоимости; большинство критериев успеха миссии (более 75 процентов) не были выполнены в связи со значительным снижением производительности.

8.3. Влияние расчетов

8.3.1. Влияние расчетов дает оценку степени, в которой результаты расчетов и моделирования влияют на инженерные решения программ/проектов. (Инженерные решения включают определение, были ли проверены требования к конструкции.)

- 8.3.1.1. **Влияние 1 – Незначительное.** Результаты расчетов и моделирования являются незначительным фактором в инженерных решениях. Они включают в себя исследование методов расчетов и расчеты и моделирование, используемые в исследовательских проектах, не имеющих прямого отношения к решениям, касающимся программ/проектов.
- 8.3.1.2. **Влияние 2 – Малое.** Результаты расчетов и моделирования являются лишь второстепенным фактором при принятии любых решений по программам/проектам. Обширные данные испытаний для реальной системы в реальных условиях доступны, и результаты расчетов и моделирования используются только в качестве дополнительной информации.
- 8.3.1.3. **Влияние 3 – Умеренное.** Результаты расчетов и моделирования являются не более чем умеренным фактором при принятии любых решений по программам/про-

ектам. Ограниченные данные испытаний для реальной системы в реальных условиях доступны, при этом доступны обширные данные испытаний для подобных систем в аналогичных условиях.

8.3.1.4. **Влияние 4 – Сильное.** Результаты расчетов и моделирования являются существенным фактором в некоторых решениях программы/проекта, но не является единственным фактором для принятия этих решений. Доступны обширные данные испытаний для подобных систем в аналогичных условиях.

8.3.1.5. **Влияние 5 – Контролируемое.** Результаты расчетов и моделирования являются определяющим фактором в некоторых решениях по программам/проектам. Не доступны ни данные полетов, ни испытаний для необходимых аспектов системы и/или окружающей среды.

8.4. Матрица оценки рисков расчетов

8.4.1. В зависимости от влияния моделирования на принятие проектных решений и от уровня последствий возможного неверного решения, расчеты и моделирование разделяются на группы по ответственности. Группы ответственности обозначены цветом в таблице (матрице) оценки рисков. Критически важные расчеты обозначены красным цветом (К), важные расчеты обозначены желтым (Ж), и вспомогательные расчеты обозначены зеленым (З).

8.4.2. Отнесение отдельных расчетов к группе ответственности определяется лицами, принимающими решения по использованию результатов расчетов.

8.4.3. Пример матрицы оценки рисков расчетов приведен на рисунке

Влияние результатов моде- лирования	5: Контролируемое	(З)	(Ж)	(К)	(К)
	4: Сильное	(З)	(Ж)	(К)	(К)
	3: Умеренное	(З)	(Ж)	(Ж)	(К)
	2: Малое	(З)	(З)	(Ж)	(Ж)
	1: Незначительное	(З)	(З)	(З)	(З)
		4: Незначительное	3: Умеренное	2: Критическое	1: Катастрофическое
Последствия неверного решения					

9. ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РАНЖИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЯВЛЕНИЙ

9.1. Предисловие

- 9.1.1. Идентификация и ранжирование явлений – экспертная оценка специалистов о значимости отдельных явлений для рассматриваемой задачи и предполагаемого использования результатов расчета, и возможности моделирования этих явлений с требуемой точностью
- 9.1.2. В данном приложении приведена процедура идентификации и ранжирования, изложенная в NUREG/CR-6978 SAND2008-3997P A Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) Exercise for Nuclear Power Plant Fire Modeling Applications [7.1.25]
- 9.1.3. Под рабочей группой в данном приложении понимается:
- 9.1.3.1. единоличный исполнитель расчета,
 - 9.1.3.2. или группа участников расчета,
 - 9.1.3.3. или эксперт, рассматривающий результаты,
 - 9.1.3.4. или группа экспертов,
 - 9.1.3.5. или группа из исполнителей расчета и экспертов,
 - 9.1.3.6. или какая-либо другая группа компетентных специалистов

9.2. Процедура

- 9.2.1. Для каждого сценария пожара члены рабочей группы осуществляют следующие этапы оценки:
- 9.2.2. Понять данный сценарий пожара и критерий выполнения требований пожарной безопасности
- 9.2.3. Идентифицировать интересующие явления и, где это применимо, ключевые параметры, связанные с любыми выявленными явлениями
- 9.2.4. Ранжировать важность каждого явления в контексте критериев
- 9.2.5. Ранжировать уровень изученности явления, относящегося к пригодности существующих средств моделирования пожара, наличие подтверждающих экспериментальных данных, и перспективы сбора данных, если имеющиеся данные не ранжируются как данные "высокой" достоверности
- 9.2.6. Ранжировать значимость и уровень изученности ключевых параметров, выявленных для какого-либо явления

9.3. Оценка важности явлений

- 9.3.1. Участники рабочей группы идентифицируют соответствующие явления и параметры, которые могут воздействовать на достоверность результатов моделирования пожара. Примерами соответствующих ключевых параметров могут служить теплопроводность стены, плотность стены и коэффициент теплопередачи ее поверхности и т.п.
- 9.3.2. На данном этапе основная задача заключается в идентификации явления. Однако при необходимости рабочая группа может определить ключевые параметры для различных явлений.
- 9.3.3. После того, как разработан перечень явлений, следующий этап анализа заключается в ранжировании каждого явления по значимости относительно критерия. Рабочая группа ранжирует значимость явлений в соответствии с идентификаторами, приведенными в таблице ниже.
- 9.3.4. Таблица - Идентификация ранжирования значимости явлений.

Идентификатор	Определение
Высокая (3)	Существенная значимость для рассматриваемого сценария
Средняя (2)	Средняя значимость для рассматриваемого сценария
Низкая (1)	Пренебрегаемая значимость для рассматриваемого сценария. Не являющаяся необходимой для моделирования данного параметра для данного применения.
Неопределенная (X)	Потенциально важное. Значимость должна быть исследована путем изучения чувствительности и/или исследовательских экспериментов и изучения таблицы идентификации явлений и их ранжирования (ТИЯР) соответственно.

9.4. Оценка изученности явлений

- 9.4.1. Следующий этап оценки заключался в ранжировании уровня изученности (состояния знаний) с точки зрения общей пригодности существующих средств моделирования пожара в соответствии с потребностями моделирования каждого идентифицированного явления.

9.4.2. Участники рабочей группы оценить пять различных параметров оценки уровня изученности.. Первый фактор изученности касается общей пригодности существующих и имеющихся в наличии моделей пожаров для работы с идентифицированным явлением. Идентификаторы, используемые рабочей группой для ранжирования, приведены в соответствующей таблице ниже.

9.4.3. Таблица - Идентификация ранжирования пригодности модели.

Идентификатор	Определение
Высокий (3)	Существует, по меньшей мере, одна проверенная физически или валидированная модель явления, которая, как предполагается, достоверно представляет явление по всей области применений сценария
Средний (2)	Была проведена существенная исследовательская деятельность, в ходе которой была выявлена, по меньшей мере, одна претендующая модель явления или зависимость, которая, как предполагается, номинально представляет явление в некоторой части области применений сценария.
Низкий (1)	Никакой существенной исследовательской деятельности не проводилось, модель явления неизвестна или не представлена теоретически
Неопределенный (X)	Рабочая группа не осведомлена о текущем состоянии средств моделирования пожара в отношении данного явления

9.4.4. Второй фактор изученности касался пригодности существующих данных, необходимых для разработки и валидации расчетной (численной) модели рассматриваемого в сценарии объекта. Идентификаторы, используемые для ранжирования пригодности существующих исходных данных и данных валидации, приведены в таблице ниже.

9.4.5. Таблица - Идентификаторы пригодности данных.

Идентификатор	Определение
Высокий (3)	Существует база данных высокого разрешения (например, набор данных степени валидации), или может быть сделана надежная оценка на основе имеющихся знаний. Необходимые данные могут быть легко получены
Средний (2)	Существующая база данных имеет среднее разрешение или не обновлялась в последнее время. Имеющиеся данные не идеальны в виду их давности или неточности. Умеренно надежная оценка моделей может быть проведена на основе имеющихся знаний
Низкий (1)	База данных имеет недостаточно данных или отсутствует

9.4.6. Заключительный аспект оценки модели и пригодности данных состоит в том, чтобы ранжировать возможность получать новые входные данные и данные валидации модели, если существующие данные были ранжированы как-нибудь иначе, помимо "высокой" пригодности. Идентификаторы, используемые для этого аспекта оценки, определены в таблице 6.4.7.

9.4.7. Таблица - Идентификаторы пригодности данных для возможности получения новых данных с целью обеспечения разработки и валидации модели.

Идентификатор	Определение
Высокий (1)	Необходимые данные могут быть легко получены на основании существующих экспериментальных возможностей
Средний (2)	Данные могут быть получены, однако для этого потребуется незначительно расширить существующие возможности, не прилагая существенных усилий
Низкий (3)	Данные не могут быть получены без усилий и/или существенных исследований

9.5. Уровни ответственности

9.5.1. Данный последний аспект процесса таблицы идентификации явлений и их ранжирования, состоящий в возможности получения новых исходных данных и данных валидации, предназначен для обеспечения дополнительного уровня оценки исходных данных для заказчика расчета. В частности, вопрос предназначен для выявления аспектов, "лежащих на поверхности", по сравнению с теми аспектами уточнения моделей пожара, которые будучи потенциально важными, не могут быть выявлены без усилий и/или затрат. Ранжирования, относящиеся к выполнимости, также отражают технический риск, связанный с поиском различных аспектов улучшения модели пожара в будущем. То есть, элементы, которые получают высокую оценку при ранжировании с точки зрения выполнимости, должны сопровождаться низким риском и высокой вероятностью успеха. В отличие от них, элементы, отмеченные низкой выполнимостью, будут сопровождаться более высоким риском и значительной вероятностью отказа.

9.5.2. В рамках процесса формирования отчетной документации, оценки ранжирования в таблицах анализируются, а идентифицированные явления обобщаются на основе четырех уровней об-

щей значимости. Общая значимость оценивается исходя из двух факторов, а именно: ранжирования значимости, присвоенного участниками рабочей группы (с учетом мнения большинства, в случае присвоения разного ранжирования) и ранжирования уровня изученности (состояния знаний). Общие уровни значимости определяются следующим образом:

- 9.5.2.1. Уровень 1: Наивысший уровень общей значимости присваивается тем явлениям, которые были отнесены к высокому уровню значимости и низкому уровню изученности.
- 9.5.2.2. Уровень 2: Второй уровень общей значимости присваивается тем явлениям, которые были отнесены к высокой значимости со средним уровнем изученности или средней значимости с низким уровнем изученности.
- 9.5.2.3. Уровень 3: Третий уровень общей значимости присваивается явлениям, которые были отнесены участниками рабочей группы к неопределенным при ранжировании значимости и/или уровня изученности. Данный уровень представляет собой области, которые, нуждаются в дальнейшем изучении, прежде чем наступит возможность проведения настоящей оценки значимости и уровня изученности.
- 9.5.2.4. Уровень 4: Четвертый уровень присваивается явлениям, которые были отнесены к одной из следующих классификаций: высокая значимость с высоким уровнем изученности; средняя значимость со средним или высоким уровнем изученности; или низкая значимость с низким, средним или высоким уровнем изученности. Данные ранжирования отражают мнение рабочей группы, согласно которому явления либо являются важными и понятными, либо являются относительно малозначительными.

9.6. Таблица идентификации и ранжирования

- 9.6.1. Пример таблицы идентификации и ранжирования явлений в расчетном сценарии, основанной на критериях важности и изученности явлений, приведен ниже. На основе этого анализа выбираются явления, подлежащие моделированию.
- 9.6.2. Для моделирования рекомендуется выбирать наиболее простые концептуальные модели из числа применимых для моделирования явлений для рассматриваемого сценария
- 9.6.3. Для разных задач и сценариев, в зависимости от сложности моделирования, объем критериев для оценки может отличаться как в меньшую, так и в большую сторону по сравнению с нижеприведенной таблицей 6.4.4 (перечень явлений и их ранжирование для абстрактного сценария приведен условно).
- 9.6.4. Таблица - ТИЯР для оценки явлений в сценарии для обоснования выбора модели

№	Явление в сценарии	Значимость в сценарии	Доступность адекватных моделей	Исходные данные и валидация модели	Возможность уточнения (калибровки) модели	Уровень важности
1	Пожарная нагрузка	высокая	высокая	низкая	средняя	1
2	Движение дымовых газов	высокая	высокая	низкая	средняя	1
3	Приток замещающего воздуха					
4	Направление и скорость ветра					
5	Температура наружного воздуха	низкая	высокая	высокая	высокая	4
6	Обнаружение возгорания пожарной сигнализацией					
7	Действие системы пожаротушения					

- 9.6.5. В ASME VV 10 [7.1.1] приведен пример ТИЯР, относящийся к анализу выбранной (выбираемой) концептуальной модели для моделирования расчетного сценария
- 9.6.6. Таблица - ТИЯР для оценки моделей, выбранных для расчета явлений сценария

№	Явление в сценарии	Значимость в сценарии	Надежность модели явления
1	Пожарная нагрузка		
2	Движение дымовых газов		
3	Приток замещающего воздуха		
4	Направление и скорость ветра	средняя	средняя
5	Температура наружного воздуха		
6	Обнаружение возгорания пожарной сигнализацией	низкая	средняя
7	Действие системы пожаротушения		

10. ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ШКАЛА ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ

10.1. Предисловие

10.1.1. Положения, приведенные в данном приложении, приведены по тексту приложения В стандарта NASA-STD-7009 «Расчеты и моделирование» [7.1.4] и являются изложением (переводом) оригинального документа.

10.1.2. Термин «шкала оценки достоверности» является переводом термина Credibility Assessment Scale. Более точным переводом термина «Credibility» является термин «Доверие» (со стороны специалистов), а не использованный в данном документе термин «достоверность». Термин «достоверность», близкий по смыслу, использован из-за большей благозвучности при построении сложных фраз.

10.2. Введение

10.2.1. Оценка доверия к результатам расчета и моделирования должна производиться с помощью шкалы оценки достоверности (ШОД) и процессов, представленных в данном приложении, содержащем поясняющие и руководящие положения. Процесс оценки включает оценку результатов расчета и моделирования по каждому из восьми факторов, а затем объединение этих восьми результатов по факторам в одно число, которое представляет общую оценку достоверности. Подробное пояснение восьми факторов приводится в разделах 10.3 и 10.4; процесс объединения приведен в разделе 10.5; и процесс сравнения рассчитанных баллов с использованием программы/порогов соответствия, установленных проектом, приведен в разделе 10.6.

10.3. Обзор факторов, подфакторов и категорий достоверности

10.3.1. ШОД состоит из восьми факторов, сгруппированных в три категории, как показано на рисунке ниже. Восемь факторов включают в себя верификацию, валидацию, происхождение исходных данных, неопределенность результатов, надежность результатов, историю использования, управление расчетом и квалификацию специалистов. Три категории включают разработку модели (верификация и валидация); выполнение расчета и моделирования (происхождение исходных данных, неопределенность результатов, надежность результатов); и Сопутствующее обоснование (история использования, управление расчетом, квалификация специалистов). Для каждого фактора определена оценка достоверности из пяти уровней.

10.3.2. Рисунок — Шкала оценки достоверности



10.3.3. Эти восемь факторов были выбраны из многочисленных факторов, которые вносят вклад в достоверность результатов расчета и моделирования, поскольку (а) по отдельности они были признаны ключевыми факторами в данном списке; (б) в совокупности они почти являются ортогональными, т.е. независимыми факторами; и (в) могут оцениваться объективно. Иными словами, основные аспекты, оцениваемые с помощью этих восьми факторов, следующие:

10.3.4. а. Разработка модели

10.3.4.1. (1) Верификация: были ли модели реализованы правильно, и в чем состояла численная ошибка/неопределенность?

- 10.3.4.2. (2) Валидация: верно ли сравниваются результаты модели и моделирования с референтными данными, и насколько близко референт к системе реального мира?
- 10.3.5. 6. Выполнение расчета и моделирования
- 10.3.5.1. (1) Происхождение исходных данных: насколько мы уверены текущих входных данных?
- 10.3.5.2. (2) Неопределенность результатов: какова неопределенность в текущих результатах модели и моделирования?
- 10.3.5.3. (3) Надежность результатов: как тщательно являются чувствительность текущих результатах модели и моделирования известно?
- 10.3.6. в. Сопутствующее обоснование
- 10.3.6.1. (1) История использования: использовались ли успешно текущие расчеты и модели ранее?
- 10.3.6.2. (2) Управление расчетом: насколько хорошо было организовано управление процессами расчета и моделирования?
- 10.3.6.3. (3) Квалификация специалистов: насколько квалифицирован персонал?
- 10.3.7. Категория разработки расчета и моделирования охватывает те их аспекты, которые относятся к общей оценке достоверности расчета и моделирования для их широкого целевого применения; выполнение расчета и моделирования направлено на аспекты, связанные с текущим их применением, чтобы предоставить конкретные оцениваемые; а категория сопутствующего обоснования рассматривает три пересекающихся фактора.
- 10.3.8. Таблица - Ключевые аспекты уровней оценки достоверности (подчеркнуты факторы с подфактором технической оценкой)

Уровень	<u>Верификация</u>	<u>Валидация</u>	<u>Происхождение исходных данных</u>	<u>Неопределенность результатов</u>	Надежность результатов	История использования	Управление моделью и моделированием	Квалификация специалистов
4	Численные ошибки незначительные для всех важных функций.	Результаты согласуются с реальными данными.	Входные данные согласуются с реальными данными.	Недетерминированный и численный анализ.	Чувствительность, известная по большинству параметров; ключевая определенная чувствительность.	Фактический стандарт.	Постоянное улучшение процесса.	Обширный опыт в использовании рекомендованных практик для конкретного расчета и моделирования.
3	Оценка формальной численной ошибки.	Результаты согласуются с экспериментальными данными для интересных задач.	Входные данные согласуются с экспериментальными данными для интересных задач.	Недетерминированный анализ.	Чувствительность, известная по множеству параметров.	Предсказуемые прогнозы были позднее подтверждены данными миссии.	Предсказуемый процесс.	Ученая степень или обширный опыт в моделировании и рекомендуемые практические знания.

2	Отдельное и регрессивное тестирование ключевых особенностей.	Результаты согласуются с экспериментальными данными или другим расчетом и моделированием по задачам единиц.	Входные данные, отслеживаемые в официальной документации.	Детерминированный анализ или мнения экспертов.	Чувствительность, известная по нескольким параметрам.	Используется до критических решений.	Установившийся процесс.	Формальная подготовка и опыт в моделировании и рекомендуемая практическое обучение.
1	Концептуальные и математические модели проверки.	Концептуальные и математические модели согласуются с простыми референсами.	Входные данные, отслеживаемые в неофициальной документации.	Качественные оценки.	Качественные оценки.	Проходит простые испытания.	Управляемый процесс.	Степень в инженерии или ученая степень.
0	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.
	Разработка модели		Выполнение расчета			Сопутствующее обоснование		

10.3.9. Фраза **недостаточное обоснование** в равной степени используется для всех факторов для характеристики уровня 0, что обозначает либо, что обоснование для этого фактора отсутствует, либо имеющееся обоснование не соответствует даже критериям уровня 1 для данного фактора.

10.3.10. Слово **положительный**, используемое в определении уровня для ряда подфакторов или факторов (обоснование верификации, обоснование валидации, обоснование происхождения исходных данных, и история использования), обозначает, что все соответствующие критерии, которые были признаны необходимыми, по мнению программы/проекта в сотрудничестве с Техническим органом, были выполнены. При отсутствии документации, подтверждающей положительное сравнение, определения уровня, содержащие эту формулировку, считаются «невыполненными».

10.3.11. Другие ключевые фразы, представленные здесь и в последующих определениях уровней, включают: **реальную систему**, **целевые задачи**, и **задачи единичных явлений**. Формулировка **реальная система** относится к реальной системе, выполнимой в своей реальной среде. **Целевая задача** относится к системам, которые настолько близки к реальной системе в реальных условиях, что они захватывают большую часть важнейшей сложности реальной системы и ее окружения (относящейся к текущему применению расчета и модели), и все же не полностью соответствуют реальной системе в ее реальной среде. Это может быть реальная система в схожей среде, или аналогичная система в реальной среде. Формулировка **задача единичных явлений** относится к задачам, которые захватывают одно или несколько физических явлений, связанных с текущим применением расчета и модели. (В некоторых дисциплинах используется формулировка «структурная единица» для того, что здесь называется задачей.) Эти термины проиллюстрированы в следующих двух примерах.

10.3.12. Уровень 4 устанавливает высокую планку: есть минимальный шанс ошибок реализации модели, численные ошибки незначительны, проверка была выполнена против реальной системы в ее реальной среде, входные данные сверяются данные от реальной системы в реальных условиях, неопределенности оценки недетерминированный и на основе реальных данных,

чувствительность к наиболее чувствительных переменных известны, модели и моделирования имеет большой опыт, процессы управления строги, и отличающийся высокой квалификацией.

- 10.3.13. Достижение рейтинг уровня 4 по шкале может быть технически осуществимо, хотя трудно. Очевидно, уровень 4 может быть достигнуто только через управление по системе, которая в этапе эксплуатации жизненного цикла. Более низкие уровни по шкале более подходящие цели для более ранних этапов жизненного цикла. Уровень 3 может быть достигнут только тогда, когда несколько ключевых факторов (валидация, происхождение исходных данных, неопределенность результатов) основаны на экспериментальных данных. Уровень 2 дает кредит сравнению с референтными данными экспертного заключения или другого модели и моделирования. Уровень 1 является минимальным доказательством того, что должны быть доступны для любого кредитного уделять.
- 10.3.14. Все факторы в категориях разработки модели и выполнении расчета и моделирования содержат элемент или подфактор технической оценки помимо стандартных составляющих. Однако, несмотря на то, что техническая оценка является ключевым фактором достоверности, как техническая оценка, здесь она рассматривается в качестве элемента среди других факторов, а не в качестве самостоятельного фактора. Каждый из факторов, включенных в категории выполнения расчета и моделирования и разработки модели, охватывает широкий круг аспектов. Для того чтобы шкала оценки достоверности (ШОД) оставалась относительно простой, выделяются только один или два наиболее важных аспекта каждого фактора для оценки в первом подфакторе – подфакторе «обоснования». Подфактор технической оценки должен охватывать наибольшее количество остальных аспектов из возможных.
- 10.3.15. Компоненты ШОД расположены в многоуровневой иерархии. Общая оценка уровня 1, факторы являются 2-го уровня, и подфакторы являются уровень 3. С отчетность оценки для категорий не требуется, они не считаются ярус им самим, а можно четко рассматриваться как таковые, если оценки доверия к отдельным категориям желательны; Таким образом, категории обозначены как уровне 1,5.
- 10.3.16. Каждый подфактор (или фактором при нет подфакторы) делится на целых уровнях в диапазоне от 0 до 4, с определениями уровня, описывающих доказательства, необходимые для достижения данного конкретного уровня. Уровень 0 не соответствует нет или недостаточности обоснования; т.е., модели и моделирования дают результаты, но нет достаточных доказательств, чтобы оправдать даже достижение уровня 1 на этой подфактору. Определения уровня приведены в таблице 1, и более подробное объяснение содержится в следующих подразделах.
- 10.3.17. Можно подумать, что важнейшей вклад в достоверности результатов модели и моделирования является их точность. В данном контексте, точность разница между выходами модели и моделирования интересующих и их истинного значения (или их предполагаемого истинного значения). Тем не менее, истинное значение практически никогда не известно. В контексте модели и моделирования, можно определить точность по сравнению с некоторыми значениями референтной. Типы референтами, представляющих интерес для модели и моделирования являются (а) с высокой точностью численный результат (предполагается, истинное значение для оценки численное ошибку), и (б) референта проверки. Один редко имеет возможность использовать в качестве проверки референта истинное значение или предполагаемую истинное значение, то есть, для реальной системы в реальных условиях (предполагаемого использования модели и моделирования), так как не имеют эти данные (в противном случае, можно было бы просто использовать его вместо результатов модели и моделирования). ШОД оценивает точность в нескольких местах-в отношении высокоточном численного результате в верификации и неопределенности результатов, и по отношению к предполагаемому истинному значению референта в валидации.

10.4. Определения уровней

- 10.4.1. В этом пункте дается подробное пояснение для различных определений уровня в ШОД. Во многих определениях уровня, несколько условий заявил. Это следует рассматривать как «и» условиях, если, конечно состояние явно не предшествует «или». Для того, чтобы претендовать на рейтинге на заданном уровне, все «и» условия должны быть соблюдены. Там нет частичное кредит, предоставляемая оценка получена из определений уровня должно быть целым числом между 0 и 4 (Средневзвешенные оценки, вытекающие из подъемные, описанной в разделе 10.4 не ограничены быть целыми.)
- 10.4.2. Категория разработки модели и моделирования

10.4.3. В центре внимания двух факторов в категории развития модели и моделирования является оценка верификации и валидации расчета. Каждый из этих факторов имеет подфактор технической оценки. Общий балл для каждого фактора является взвешенной суммой двух подфакторов в процессе сворачивания,

10.4.4. Таблица — Определения уровней для доказательства подфакторов в категории разработки модели и моделирования

Уровень	Обоснование верификации	Обоснование валидации
4	Надежные методы оценки ошибок используются для количественной оценки численных ошибок. Эти оценки показывают, что ошибки малы из тестов, которые осуществляют все важные алгоритмы, все важные функции и возможности, и всех важных муфт (физики, модулей и т.д.) полной вычислительной модели.	Результаты модели и моделирования выгодно для реального мировой системы в точках проверки путем сравнения результатов модели и моделирования до приемлемого референта, который измерения на реальных системы.
3	Некоторые формальный метод используется для оценки численных ошибок, связанных с модульного тестирования со значительным охватом кода.	Результаты модели и моделирования хорошо согласуются в точках проверки путем сравнения результатов модели и моделирования с приемлемой базой сравнения, которой являются результаты экспериментальных измерений по интересующим задачам.
2	Благоприятные результаты блока и регрессионного тестирования ключевых особенностей вычислительной модели.	Результаты модели и моделирования выгодно для единичных проблем в точках проверки путем сравнения результатов модели и моделирования до приемлемого референта, который либо экспериментальные измерения или более высокого верности результаты модели и моделирования.
1	Положительное обоснование верификации для концептуальных и математических моделей.	Концептуальные и математические модели и моделирования выгодно сравнивать с референтами «общей задачи» и «учебник».
0	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.

10.4.5. Подфактор обоснования верификации

10.4.6. Верификация представляет собой процесс определения того, что вычислительная модель точно представляет основную математическую модель и ее решение с точки зрения предполагаемого использования расчета и модели. В своих самых элементарных уровнях это предполагает уверенность, что концептуальные и математические модели являются правильными.

10.4.7. Кроме того, есть два разных аспекта верификации расчетной модели: (а) это правильно закодированные (верификация кода) и (б) являются численные ошибки небольшие (верификация расчета), то есть, то, что является численной точностью? В случае математических моделей, основанных на дифференциальных уравнений (обыкновенных или частных), подробное обсуждение различия между этими двумя аспектами обеспечивается в ASME V & V 10 [7.1.1] и Оберкамф и др., 2007 [7.1.16].

10.4.8. Ключевые аспекты верификации кода являются регрессионное тестирование и тестирование модулей. Первая из них является процесс тестирования изменения в расчетных моделей, чтобы убедиться, что старые аспекты по-прежнему работать с новыми изменениями. Последний представляет собой процедура используется для проверки, что отдельные подразделения вычислительных моделей работают должным образом. (В данном контексте единица является наименьшим проверяемым часть вычислительной модели.)

10.4.9. По крайней мере, для математических моделей, основанных на дифференциальных уравнений, вычислительной модели неизбежно страдает от некоторого уровня численной ошибки.

10.4.10. Уровни 3 и 4 требуют оценку размера численной ошибки. Некоторые примеры формальных методов оценки численной ошибки являются эвристические оценки погрешности усечения использованием разложения Тэйлора (в случае конечно-разностных аппроксимаций) и строгие оценки погрешности (в случае конечно-элементных приближений). Уровень 3 требуется демонстрируя, что оценивается численной ошибке приемлемо мала для единичных проблем. Уровень 4 требуется более комплексный демонстрацию, что численной ошибке приемлемо мала.

10.4.11. Для подфактора обоснования верификации, оценка уровня n ($n > 2$) требует, чтобы все условия для уровней 1, ..., $n-1$, удовлетворяются в дополнение к условиям на уровне n , т.е., уровень 3 рейтинг требует, чтобы условия на уровнях 1 и 2 также будут удовлетворены.

10.4.12. Подфактор обоснования валидации

- 10.4.13. Одобрение представляет собой процесс определения, в какой степени модель или имитация является точное представление о реальном мире с точки зрения предполагаемого использования модели или к симуляции. Это предполагает как достоверность результатов-величины численной разницы между средней результата модели и моделирования и среднего референтной данных-и связанной с ним неопределенности-распространением о средствах. Оба из них оцениваются в точке проверки, то есть, точки, в которых производится сравнение. Благоприятный Сравнение результатов модели и моделирования и данных референтных требуется как минимум, что некоторое совпадение между интервалами неопределенности вокруг средств.
- 10.4.14. Вспомогательный аспект проверки включает в себя чувствительность как референта и результатов модели и моделирования по отношению к изменениям от номинальных входных переменных и параметров. Хотя это, конечно, рекомендуется, что чувствительность результатов модели и моделирования будет похож на референта, экспериментальные данные о чувствительности редко имеются в наличии. Соответственно, этот аспект не оценивается по подфактора обоснования валидации.
- 10.4.15. «Благоприятным Сравнение с реальной системой» фразу в уровне 4 включает обеспечение того, чтобы данные для реальной системы соответствует адекватно современному состоянию (в том числе любой старение или изменения) системы, т.е., последняя часть пункта (е) Диас действий # 4 должны быть удовлетворены.
- 10.4.16. Для подфактора обоснования валидации, оценка уровня p ($p > 2$), требует, чтобы все условия для уровней 1, ..., $p-1$, удовлетворяются в дополнение к условиям на уровне p , т.е., уровень 3 рейтинг требует что условия в уровнях 1 и 2 также будут удовлетворены.

10.4.17. Категория выполнения расчета и моделирования

- 10.4.18. В центре внимания этих трех факторов в категории операций с моделью и моделированием является оценка этих результатов модели и моделирования, которые поддерживают определенную критическую решение в вопросе. Каждый из этих факторов имеет подфактор технической оценки. Общий балл для каждого фактора является взвешенной суммой двух подфакторов в процессе сворачивания,.

- 10.4.19. Таблица - Определение уровней подфакторов обоснования в категории выполнения расчета и моделирования

Уровень	Обоснование происхождения исходных данных	Обоснование неопределенности результатов	Обоснование надежности результатов
4	Входные данные сопоставимы с данными измерений реальной системы, или входные данные получены из модели и моделирования с общей оценкой достоверности, превышающей 3,5. Известна неопределенность, связанная с входными данными.	Оценка неопределенности является количественной и основана на недетерминированном и численном анализе.	Чувствительность результатов модели и моделирования для реальной системы количественно известна для большинства переменных и параметров, включая все наиболее чувствительные переменные и параметры.
3	Входные данные сопоставимы с приемлемыми измеренными референтными данными из интересующих задач, или входные данные получены из модели и моделирования с рейтингом резюме доверия выше 3,0. Известна неопределенность, связанная с входными данными.	Оценка неопределенности является количественной и основана на недетерминированном анализе.	Чувствительность результатов модели и моделирования для реальной системы количественно известна для многих переменных и параметров.
2	Входные данные отслеживаются до официальной документации, или входные данные получены из модели и моделирования с общей оценкой достоверности, превышающей 2,0.	Оценка неопределенности является количественной и основана на недетерминированном анализе или мнении экспертов.	Чувствительность результатов модели и моделирования для реальной системы количественно известна для нескольких переменных и параметров.
1	Входные данные отслеживаются до неофициальной документации, или входные данные получены из модели и моделирования с общей оценкой достоверности, превышающей 1,0.	Оценка неопределенности является качественной.	Чувствительность результатов модели и моделирования для реальной системы оценивается по аналогии с количественной чувствительностью аналогичных интересующих задач.
0	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.

10.4.20. Подфактор обоснования происхождения исходных данных

- 10.4.21. Происхождение входных данных предполагает оценку всех данных, которые используются в качестве входных данных для текущих результатов модели и моделирования. Оно включает

в себя не только данные уникальные для этой модели, но и данных, которые полученные путем другого моделирования. В первом случае входные данные оцениваются непосредственно, в последнем случае входные данные оцениваются косвенно с помощью показателя (ей) оценки достоверности модели и моделирования, из которых получены данные. Следует отметить, что достижение уровней 3 и 4 требует, чтобы была известна неопределенность, связанная с входными данными.

- 10.4.22. Прямая оценка входных данных на уровнях 1 и 2 требует прослеживаемости документации входных данных. Неофициальная документация является лишь письменной документацией, которая не была независимо проанализирована.

10.4.23. Подфактор обоснования неопределенности результатов

- 10.4.24. Неопределенность результатов является количественной оценкой неопределенности в текущих результатах модели и моделирования. Два важных аспекта неопределенности являются (а) размер неопределенности, например, размер интервала неопределенности; и (б) уверенность в или качество оценки неопределенности, например, статистической достоверности заявления или основательностью, используемой в оценке. В зависимости от применения, только один из них или оба из них могут быть важны. Ответственная сторона выберет состоит ли критерии неопределенности из (а) только, (б) или по обоим (а) и (б). Неопределенность в результатах модели и моделирования зависит от неопределенности во входных переменных и параметрах, а также от численных ошибок.

- 10.4.25. На уровне 1 неопределенность описывается только качественно, т.е., в лингвистических терминах. На уровне 2 неопределенность описывается в числовых терминах, то есть, как представлены интервалы неопределенности по результатам модели и моделирования. Интервал неопределенности может быть основана на мнении эксперта предметной и/или по количественным неопределенности в наиболее соответствующей точки проверки. На уровне 3, в заявлении неопределенность численное и использует недетерминированном анализа (в том числе обычной вероятностного анализа, а также подходов, таких как интервального анализа, теории доказательств, нечеткой логики и теории возможностей); этот уровень может быть достигнут путем формального применения недетерминированном анализа с набором предмете экспертных заключений; на этом уровне, неопределенность, вероятно, будет указано без мерой доверия, связанный с интервалом неопределенности. На уровне 4, в заявлении неопределенность делает использование недетерминированном анализа, но будет также включать уровень доверия, связанный с интервалом неопределенности; то есть, некоторые численная оценка неопределенности в численном интервала неопределенности был сделан.

- 10.4.26. Подфактор обоснования надежности результатов

- 10.4.27. Надежность результатов определяет, насколько четко известна чувствительность текущих результатов расчета (к переменным и параметрам расчета и моделирования). Цель учета надежности заключается в том, чтобы сформировать понимание чувствительности реальной системы к возможным изменениям в переменных и параметрах системы. Следовательно, понимание того, насколько точно чувствительность модели и моделирования совпадает с реальной системой, представляет особый интерес.

- 10.4.28. Моделирование стремимся подражать реальный мир или предлагаемый реальный мир посредством вычислительной модели. В идеале, подражали система ведет себя подобно реальной системы. То есть, если в реальном мире система чувствительна к определенным переменных или параметров, то результаты модели и моделирования должны быть чувствительны аналогично. Уровень соглашения между реальной системы и результатов модели и моделирования находится в пределах домена фактора валидации и не фактор надежности.

- 10.4.29. Что представляет собой «несколько», «много», и «большинство» в уровнях 2, 3 и 4 нельзя указать точно. В качестве ориентира, «несколько» должно означать, что чувствительность, скажем, менее 20 процентов потенциальных переменным и параметрам известна; «Многие» должно означать, что чувствительность, скажем, от 20 до 50 процентов известна; на уровне 4, «большинство» подразумевает, что большая часть (то есть, >50 процентов) всех параметров и переменных известна, в том числе все наиболее чувствительные переменные и параметры.

10.4.30. Категория сопутствующего обоснования

- 10.4.31. В центре внимания этих трех факторов в категории сопутствующего обоснования находится оценка трех элементов процесса модели и моделирования, которые могут косвенно повлиять на достоверность результатов модели и моделирования. Факторы, включенные в целях История, модели и моделирования Управление, и люди квалификации. Коэффициент использования История описывает степень предварительного использования модели и моделирования в подобных ситуациях для принятия критически важных решений. Коэффициент модели и моделирования с функцией управления оценивает уровень формальности, применяемой программы или проекта в надзоре за модели и моделирования. Квалификация людей является

фактором, оценивающим подготовку и опыт разработчиков, операторов и аналитиков, проводящих расчет и моделирование. Определения уровня для этих трех факторов приведены в таблице ниже.

10.4.32. Таблица — Определение уровней для факторов в категории сопутствующего обоснования

Уровень	История использования	Управление расчетом	Квалификация специалистов
4	Фактический стандарт.	Непрерывное улучшение процесса: попытка расчета и моделирования, используя измерения процессов расчета и моделирования с целью улучшить повторяемость результатов расчета и моделирования.	Имеет высшую техническую или научную степень либо большой опыт работы в расчетах и моделировании, имеет широкий опыт разработки и использования рассматриваемых расчетов и моделей, и применил конкретные рекомендуемые практики, связанных с текущими моделями.
3	После принятия решения в реальном мире события были точно представлены в результатах (например, подтверждено данными миссии).	Предсказуемый процесс: попытка модели и моделирования измеряет повторяемость результатов модели и моделирования, порожденных процессами модели и моделирования.	Обладает прогрессивное техническое или ученую степень, или большой опыт работы, имеет общую подготовку модели и моделирования, имеет определенный опыт работы с пересматриваются модели и моделирования, и прошел подготовку по конкретным рекомендованной практики, имеющих отношение к текущему приложению.
2	Использовано ранее для выполнения анализа, на котором важные решения были сделаны.	Созданная процесса: попытка модели и моделирования установила документированный процесс для модели и моделирования разработки и осуществления ее.	Обладает инженерное или ученую степень, получил формальное обучение в формулировке модели и моделирования и общего обучения в рекомендуемой практики для модели и моделирования, и разработала продукты модели и моделирования.
1	Конкретные сценарии были созданы, чтобы проверить заявление или результаты сопоставимы с выходов от других аналогичных инструментов.	Управляемый процесс: роли и обязанности в модели и моделирования были определены.	Обладает инженерное или ученую степень, была введена к теме модели и моделирования, и подвергся воздействию общих рекомендуемых практик в модели и моделировании.
0	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.	Недостаточное обоснование.

10.4.33. Фактор истории использования

10.4.34. Использование История оценивает, насколько интенсивно модели и моделирования в текущем приложении были использованы в тех же или аналогичных целях в прошлом. Это оценивает «Происхождение» модели и моделирования. Нетривиальные уровни колеблются от благоприятных сравнений с другой модели и моделирования (уровень 1) до модели и моделирования, которые были использованы ранее для критических решений с подтверждением после полета и ставших де-факто стандарты (уровень 4).

10.4.35. Для фактора Использование истории, уровень 3 рейтинг требует, чтобы условия на уровне 2 также будут удовлетворены. Для того чтобы претендовать на уровне 4 не только должны условия на уровне 2 и уровне 3 довольны, но и модели и моделирования должны быть широко использованы для конкретного применения.

10.4.36. Фактор управления расчетом

10.4.37. Термин модели и моделирования с функцией управления используется для описания степени, в которой попытка модели и моделирования обладает свойствами управления работы продукта; Определение процесса; Измерение процесс; управления процессом; изменение процесса; постоянное совершенствование, и поддержка и обслуживание модели и моделирования. Уровни аналогичны тем, которые в большинстве моделей зрелости процесса.

10.4.38. Для фактора управления модели и моделирования, оценка уровня n ($n > 2$), требует, чтобы все условия для уровней 1, ..., $n-1$, удовлетворяются в дополнение к условиям на уровне n , т.е., рейтинг уровня 3 требует, чтобы условия на уровнях 1 и 2 также были удовлетворены.

10.4.39. Фактор квалификации специалистов

10.4.40. Люди Квалификация относится к квалификации персонала в использовании и / или интерпретировать результаты модели и моделирования. Квалификация персонала оцениваются с

точки зрения общего образования, общего опыта, специальной подготовки для субъекта модели и моделирования, и конкретного опыта с предметом модели и моделирования. Образование и опыт включают рекомендуемой практики в целом и для субъекта модели и моделирования.

- 10.4.41. Если нет рекомендуемой практики не были определены, то условия, относящиеся к рекомендуемой практике в определениях уровня не применяются; т.е., они не имеют никакого влияния на уже или нет было достигнуто частности уровень. Прилагательное «обширный» в определении термина уровне 4 означает, что человек (или руководитель команды) имеет достаточный опыт наставника новичков на тему модели и моделирования без дополнительной технической надзор, и для уровня 3 это означает, что человек (или руководитель команды) имеет достаточный опыт, чтобы наставник новичков на тему дисциплины (не обязательно модели и моделирования) без дальнейшего технического надзора. Термин «формальное обучение» означает обучение под руководством инструктора классе, по крайней мере в глубине семестрового университетского курса в старших курсов или выпускников уровне.

10.4.42. Подфакторы технической оценки

- 10.4.43. Пять из восьми факторов содержат элемент технической оценки, который оценивает уровень экспертной оценки, который был успешно завершен в отношении к данному фактору. Под «экспертной оценкой» понимается оценка, проводимая одним или несколькими лицами равной технической квалификации для лица (лиц), ответственных за работу, подлежащую оценке. «Неофициальная экспертная оценка» - это оценка, не проводимая в соответствии с процессом, установленным организацией проводящей или проходящей оценку, «официальная экспертная оценка» - это оценка, которая, утвержденная программой/проектом и приводящаяся в соответствии с правилами четко установленными организацией, проводящей или проходящей оценку. Экспертные оценки, подразделяются на «внутренние» или «сторонние» в зависимости от того являются ли члены оценивающей группы преимущественно представителями ведущего центра проекта или нет.

- 10.4.44. Этот подфактор появляется в каждом из следующих факторов: верификации, валидации, происхождение исходных данных, неопределенности результатов и надежности результатов. Причина этого повторения состоит в том, что многочисленные оценки, как правило, проводятся на протяжении жизненного цикла программы или проекта, при этом каждая оценка посвящена конкретным темам. Нет ничего необычного в том, что эксперты по разным вопросам участвуют в различных оценках в зависимости от их занятости в определенное время и их специализации. Точно так же, те же самые специалисты могут выступать в качестве рецензентов в различных ролях на протяжении всего жизненного цикла программы или проекта, опять же в зависимости от их занятости и компетенции.

- 10.4.45. Определения уровней для подфакторов полной технической оценки представлены в таблице ниже. Они одинаковы на уровнях от 0 до 3. На уровне 4 фраза, выделенная курсивом, должна быть заменена на соответствующее название фактора. Например, уровень 4 для верификации технической оценки обозначает «положительную стороннюю экспертную оценку, сопровождаемую независимой верификацией». В целом оценка уровня 4 будет также включает независимую обработку соответствующих выводов сторонними специалистами или их представителями.

- 10.4.46. Таблица — Определение уровней для технического обзора подфакторов

Уровень	Техническая оценка
4	Положительная сторонняя экспертная оценка, сопровождаемая независимой <i>оценкой факторов</i> .
3	Положительная сторонняя экспертная оценка.
2	Положительная официальная внутренняя экспертная оценка.
1	Положительная неофициальная внутренняя оценка.
0	Недостаточное обоснование.

- 10.4.47. Хотя для описания различных уровней в подфакторе технической оценки используется один тот же язык, предполагается, что оценки для каждого фактора сосредоточены исключительно на материале, относящемся к данному фактору. Это не означает, однако, что оценки по темам нескольких факторов не могут рассматриваться в рамках одного собрания оценивающей группы.

10.5. Процессы формирования сводки оценки достоверности

- 10.5.1. Предписание значений веса для подфакторов

- 10.5.2. Основное внимание в ШОД уделяется баллам по восьми факторам; и далее внимание уделяется общему счету, который является минимум баллов по восьми факторам. Пять факторов категорий разработки модели и выполнения расчета и моделирования являются средними

весовыми коэффициентами соответствующих подфакторов обоснования и технической оценки. Однако основной упор делается на оценки на фактором яруса; подфактор технической оценки просто служит для настройки доказательную подфактор по результатам внутренних и внешних оценок. Необязательный отчет в категории яруса рассмотрены в конце этого пункта.

10.5.3. Рисунок — Значения веса подфакторов



10.5.4. На рисунке выше изображены 10 значений веса, которые необходимы для сводки подфакторов для фактора яруса. Ограничения на этих весов следующим образом:

10.5.4.1. Каждый вес лежит на отрезке $[0, 1]$.

10.5.4.2. Сумма каждой пары подфакторов, например, W_{11} и W_{12} , равна 1.

10.5.4.3. Весовой коэффициент подфактора для технической оценки далее ограничивается до значения не более 0,3.

10.5.5. Достигнутый результат на самом низком уровне (коэффициент или подфактор) основан на объективной оценке документального обоснования в сравнении с определением уровня. В категориях модели и моделирования развития и модели и моделирования операций, достигается оценка фактором является Свидетельство забить раз вес Свидетельство плюс балл оценки, умноженный на вес оценки. Ограничение в. ограничивает сумму, на которую техническая оценка может увеличить или уменьшить балл фактора по отношению к баллу подфактора обоснования. В самом крайнем случае, с баллом обоснования, равным 0 и технической оценкой, равной 4,0, балл фактора равен 1,2.

10.5.6. Выбор весовых коэффициентов обязательно является субъективным. Ответственная сторона, обозначенная программами и проектами будет выбирать различные весовые коэффициенты, подлежащие утверждению руководством программой/проектами и технического органа.

10.5.7. Сводка 8-ми баллов факторов в общий счет осуществляется с применением минимум 8-ми баллов фактором.

10.5.8. Примеры сводки

10.5.9. Иллюстрация сводки от подфактор к фактору приводится в таблице 10.5.10. В этом случае основной балл подфактора 3 слегка повышен до 3,3 вследствие жесткой технической оценки.

10.5.10. Таблица — Сводка баллов подфактора в соотношении с фактором

Подфактор	Вес подфактора	Оценочный балл	Балл по весу	Балл фактора
Обоснование валидации	0,7	3	2,1	3,3
Техническая оценка валидации	0,3	4	1,2	

10.5.11. Пример сводки от фактора уровня в соотношении с общим баллом приведен в таблице ниже. Общая оценка представляет собой минимум баллов фактора. Баллы сообщаются только для двух значимых чисел, так как перенос более чем одного числа после десятичной запятой означает ложное ощущение точности.

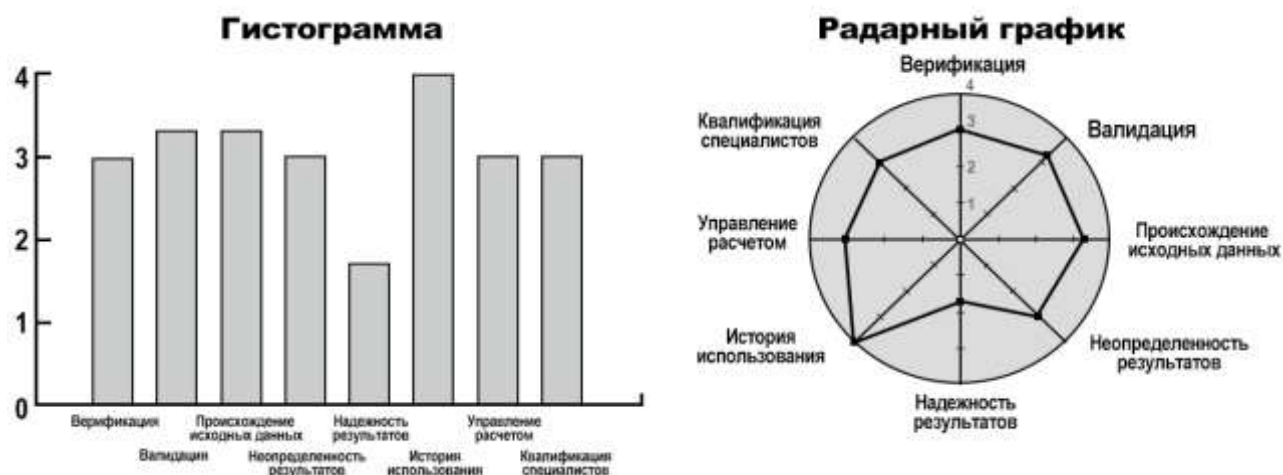
10.5.12. Таблица — Сводка от фактора уровня в соотношении с общим баллом

Фактор	Балл фактора	Общий балл
Верификация	3	
Валидация	3,3	
Происхождение входных данных	3,3	

Неопределенность результатов	3	1,7
Надежность результатов	1,7	
История использования	4	
Управление моделью и моделированием	3	
Квалификация специалистов	3	

10.5.13. Отчетность по результатам расчетов и моделирования будет сопровождаться отчетами с оценкой по восьми факторам и одной общей оценкой. Возможные форматы отчетности для оценки по факторам — гистограммы и радарные графики, как показано на рисунке, приведенном ниже.

10.5.14. Рисунок — Гистограмма и радарный график для баллов фактора



10.5.15. Отчетность из десятков в категории уровня является обязательным. Если это происходит, то это выполняется, принимая минимум всех баллов фактором в категории. См. таблицу ниже с иллюстрацией сводки к категории операций с моделями и моделированием, соответствующие баллам фактора в примере в таблице 10.5.12.

10.5.16. Таблица — Сводка баллов фактора к категории баллов

Фактор	Балл фактора	Балл категории
Происхождение входных данных	3,3	1,7
Неопределенность результатов	3	
Надежность результатов	1,7	

10.6. Сравнение с пороговыми значениями достаточности

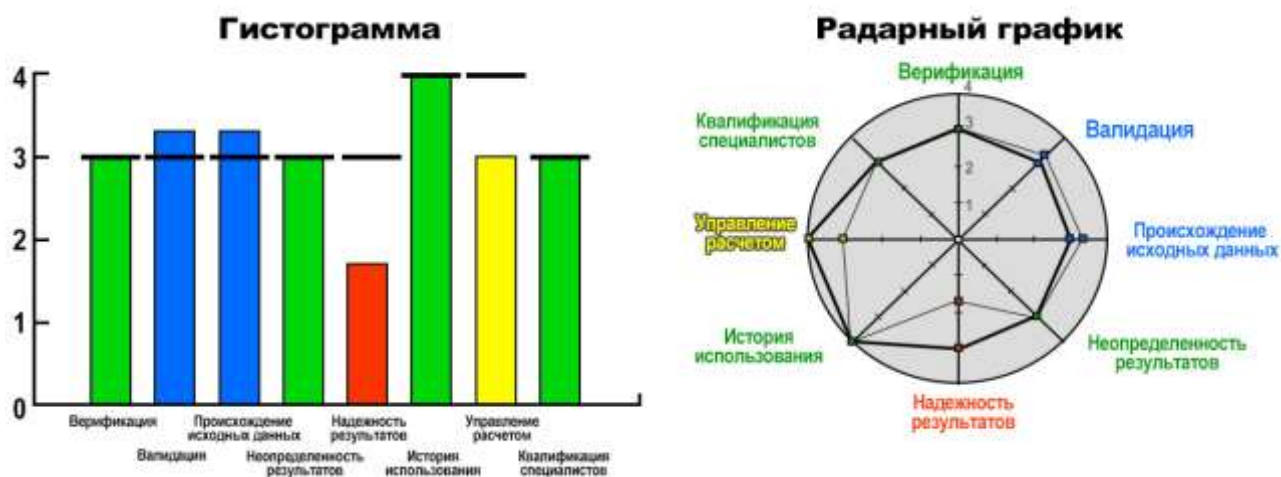
10.6.1. В разделах 10.3 и 10.4 представлена и описана шкала оценки достоверности (ШОД) — общий уровень, уровень категории, фактора и подфактора, наряду с соответствующими определениями уровня самого низкого уровня, с которым сопоставлены результаты расчета и моделирования. В разделе 10.5 представлена методика сведения начисленных баллов от одного уровня к следующему уровню выше. В данном разделе представлены и описаны пороговые значения достаточности или соответствия (так называемые столбцы «пригодности»), установленные ответственной стороной, с которыми сравниваются полученные при оценке баллы для назначенной цели. Понятие пороговых значений далее подкреплено с помощью соответствующих «флажков недостаточности/превышения», обеспечивающие ключевые моменты на уровне управления недостаточности/превышения средств, по сравнению с пороговыми значениями, измерения фактора доверия расчета и моделирования. Данная структура позволяет получить простые «показатели приборной доски» достоверности результатов расчетов и моделирования для руководства высшего звена, а также полное отслеживание уровня достоверности оценок нижнего звена, необходимых для оказания технической обратной связи для разработчиков и пользователей.

10.6.2. Ответственная сторона устанавливает желаемые пороговые значения для каждого из факторов в шкале оценки достоверности (ШОД) с учетом того, что является «пригодным» для этого фактора по предполагаемому значению. Пороговые значения должны быть целыми числами от 0 до 4 включительно. Кроме того, пороговые уровни должны (а) изменяться в течение всего жизненного цикла проекта, поддерживаемого расчетом и моделированием, и (б) зависеть от тяжести риска, связанного с решением.

10.6.3. Сравнение уровня порогового значения коэффициента, установленного ответственной стороной и оценочным баллом, используется для определения пригодности применения расчета и моделирования для каждого коэффициента достоверности. Если оценочный балл коэффициента

циента равен пороговому значению, то условие коэффициента выполнено; и флажок недостаточности/превышения окрашен зеленым, это означает, что расчет и моделирование достигли достаточного уровня доверия. Если балл на более чем половину единицы ($> 0,5$) ниже порогового значения, будет установлен флажок недостаточности, указывая, что доверие не соответствует коэффициенту для применения расчета и моделирования. Разрыв недостаточности превышающий половину единицы ($> 0,5$), но меньше или равный единице ($< 1,0$) окрашивает флажок желтым. Разрыв недостаточности, превышающий единицу ($> 1,0$) по шкале окрашивает флажок красным. Если балл превышает пороговое значение, будет установлен флажок превышения синего цвета, указывая на то, что уровень доверие превышен для коэффициента для применения расчета и моделирования. Эти флажки используются, чтобы показать условия недостаточности/превышения вплоть до 1-го уровня по общему баллу. Изображение этих флажков на уровне коэффициента приведено на рисунке 10.6.4.

10.6.4. Рисунок — Пороговые значения достаточности и цветовое кодирование на гистограмме и радарном графике для баллов коэффициента



11. ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

11.1. Предисловие

- 11.1.1. Данное приложение является изложением раздела 2-4 стандарта ASME V&V 20-2009 [7.1.3]
- 11.1.2. Встречающиеся в приложении рекомендуемые значения параметров, например, коэффициент надежности F_s , основаны на обобщении практики расчетов и исследованиях численных методов моделирования, приведены для задач вычислительной гидродинамики. Для других областей применения, например, задач расчета конструкций, значения параметров могут отличаться в зависимости от решаемой задачи и применяемых математических моделей и численных методов.

11.2. Процедура оценки погрешности

- 11.2.1. Ниже определена пятиступенчатая процедура для применения метода индекса сходимости сетки [7.1.19].
- 11.2.2. Пятишаговая процедура, представленная в данном разделе, не делает различий между не-изменяющимися вычислениями или вычислениями, зависящими от времени. Данный метод не зависит от временного решения, следовательно, Δt не появляется ни в одном из уравнений. Таким образом, для зависящих от времени вычислений, пятишаговая процедура должна применяться на каждом соответствующем временном шаге при расчете на данном узле. Однако следует отметить, по мере того, как пространственная сетка измельчается во время исследования сходимости, размер Δt также уменьшается из-за численной неустойчивости, таким образом, Δt неявно учитывается при исследовании сходимости. Хотя это и не упоминается, здесь показано, что представленная процедура может явно применяться как для пространственной, так и для временной сходимости сетки. Однако, как правило, возникают некоторые незначительные осложнения, когда численные методы имеют разные порядки точности в пространстве и времени, или даже разные порядки в разных пространственных направлениях, что может встречаться в решениях в пограничных слоях.
- 11.2.3. **Шаг 1:** Выбирается размер характерной ячейки, или размер сетки, h . Например, для трехмерных, регулярных, геометрически подобных сеток (не обязательно прямоугольных),

$$h = [(\Delta x_{\max})(\Delta y_{\max})(\Delta z_{\max})]^{1/3}$$

11.2.4.

11.2.5. Для нерегулярных сеток можно определить

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

11.2.6.

где

N = общее число клеток, используемых для вычислений

ΔV_i = объем ячейки i^{th} [7.1.13]

- 11.2.7. **Шаг 2:** Выбирается три значительно разных набора разрешения сетки и выполняется расчет для определения значений ключевых переменных, важных для цели исследования модели. Желательно, чтобы коэффициент уточнения сетки, $r = h_{\text{coarse}}/h_{\text{fine}}$, был больше, чем 1,3 для большинства практических задач. (h_{coarse} - размер более «грубой» сетки, т.е. сетки с большим размером элементов, h_{fine} - размер более «точной» сетки, т.е. сетки с меньшим размером элементов). Это значение 1,3 вновь основано на опыте, а не на каком-то формальном отклонении. Уточнение сетки должно быть систематическим; то есть, само по себе должно быть структурированным даже если сетка не является структурированной. Геометрически схожие ячейки в последовательности уточнений сетки должны избегать излишних и ошибочных r . Настоятельно рекомендуется не использовать различные коэффициенты уточнения сетки в разных направлениях (например, $r_x = 1,3$ и $r_y = 1,6$), поскольку в результате возникают ошибочные наблюдаемые значения p , как показано в [7.1.20].

11.2.8. **Шаг 3:**

- 11.2.9. Принимается, что $h_1 < h_2 < h_3$ и $r_{21} = h_2/h_1$, $r_{32} = h_3/h_2$, и рассчитывается очевидный (или наблюдаемый) порядок сходимости сетки, p , [7.1.13]

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

11.2.10.

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

11.2.11.

$$s = 1 \cdot \text{sign}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21})$$

11.2.12.

11.2.13. где $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$, $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$, а φ_k – значение моделирования переменной на сетке k^{th} . Следует отметить, что $q(p)=0$ для $r = \text{постоянная}$. Эта группа из трех уравнений может быть решена с помощью итераций с начальным приближением, при $q = 0$.

11.2.14. Минимум четыре сетки требуется, чтобы продемонстрировать, что наблюдаемый порядок p является постоянным для серии моделирования. Решение с тремя сетками для наблюдаемого порядка p может быть верным, если некоторые из значений переменной φ , прогнозируемые на трех сетках находятся в асимптотической области для серии моделирования. В действительности, может потребоваться более четырех сеток, чтобы убедительно продемонстрировать асимптотическую сходимость, возможно, пять или шесть сеток в случаях, когда сходимость подвержена вычислительным погрешностям [7.1.21, 7.1.22, 7.1.23]. Это зависит от используемого исходного разрешения сетки и расположения прогнозируемого значения φ как функции разрешения сетки. Однако, чтобы обеспечить баланс между вычислительными затратами и обеспечением уровня точности в определении наблюдаемого порядка p , должно быть выполнено по меньшей мере исследование с тремя сетками.

11.2.15. **Шаг 4:** Рассчитать экстраполированные значения из уравнения

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

11.2.16.

11.2.17. **Шаг 5:** Рассчитать и сообщить следующие оценки погрешности наряду с методом наблюдаемого порядка p . Приблизительная относительная погрешность может быть приведена в безразмерном (уравнение 11.2.18) или в размерном виде (уравнение 11.2.19):

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right|$$

11.2.18.

$$e_a^{21} = |\varphi_1 - \varphi_2|$$

11.2.19.

11.2.20. Если φ_1 , равна нулю или пользователь хочет вычислить u_{num} (см. уравнение 11.2.22 и 11.2.23), то следует использовать уравнение 11.2.19).

11.2.21. Расчетное экстраполированная относительная погрешность:

$$e_{\text{ext}}^{21} = \left| \frac{\varphi_{\text{ext}}^{21} - \varphi_1}{\varphi_{\text{ext}}^{21}} \right|$$

11.2.22.

11.2.23. Значение индекса сходимости сетки (GCI):

$$\text{GCI}_{\text{fine}}^{21} = \frac{Fs \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1}$$

11.2.24.

11.2.25. Оценки относительной погрешности и индекс сходимости сетки (GCI) могут использовать нормализацию на основе других значений помимо локальных; часто это даже выгодно для того, чтобы избежать неопределенностей. Кроме того, оценки погрешности и индекс сходимости сетки могут использовать размерные значения вместо относительных или нормированных значений [7.1.13, стр. 113, 115].

11.3. Коэффициент надежности

11.3.1. Коэффициенту надежности, Fs , первоначально было присвоено значение 3 для исследований с двумя сетками [7.1.24], и $Fs = 1,25$, при использовании по крайней мере трех сеток наблюдаемой сходимости.

11.3.2. Форма индекса сходимости сетки основана на теоретических данных, однако использование абсолютных значений для оценки погрешностей и коэффициента Fs основаны на эмпирических данных, включающих рассмотрение нескольких сотен исследований в области вычислительной гидродинамики. Эмпирические испытания включали в себя определение консервативности в 95% случаев, что соответствует (размерному) индексу сходимости сетки $\text{GCI} = u_{\text{num}}$ с уверенностью, составляющей 95%. Никаких предположений о форме распределений погрешности сделано не было и в них было необходимости для этих эмпирических исследований. В частности, общее статистическое предположение о гауссовом распределении не

было использовано. Для согласования использования одного стандартного отклонения σ с новым международным стандартом, было разработано уравнение $u_{val} = \sqrt{u_{num}^2 + u_{input}^2 + u_D^2}$ с использованием 1σ и соответствующей неопределенности u_{num} . Если процедура, принятая для других компонентов неопределенности, будет основываться все на часто используемом расширенном уровне неопределенности $U_{95\%}$, то $u_{num} = GCI$ и предположений о распределении не требуется. В противном случае, чтобы конвертировать этот (частично) эмпирический индекс сходимости сетки GCI из u_{num} в u_{num} , что необходимо для данного уравнения необходимо сделать предположение. Если бы распределение было гауссовым относительно решения точной сетки, то значение u_{num} было бы получено с использованием коэффициента расширения $k = 2$, и необходимый член для уравнения $u_{val} = \sqrt{u_{num}^2 + u_{input}^2 + u_D^2}$ был бы

11.3.3. $u_{num} = U_{num}/k = GCI/2$

11.3.4. Однако распределение погрешности в отношении точной сетки является гауссовым только приблизительно для плохо оптимизированных задачах (колебательная конвергенция). Для хорошо оптимизированных задач и задач с высоким разрешением распределение погрешности является приблизительно гауссовым не в отношении точного решения сетки φ_1 , а скорее в отношении экстраполированного решения φ_{ext}^{21} уравнения (11.2.16) [т. е. решение с измельченной сеткой φ_1 с добавлением предполагаемой подписанной погрешности e_{ext}^{21} уравнения (11.2.22)]. Таким образом, распределение погрешности в отношении решения точной сетки является приблизительно сдвинутым гауссовым. Анализ этой ситуации указывает на коэффициент $k = 1,1$ до $1,15$? чтобы получить консервативное значение для u_{num} .

11.3.5. $u_{num} = U_{num}/k = GCI/1.15$

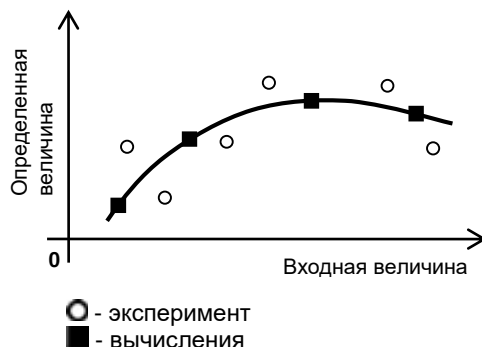
12. ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РАСЧЕТА

12.1. Предисловие

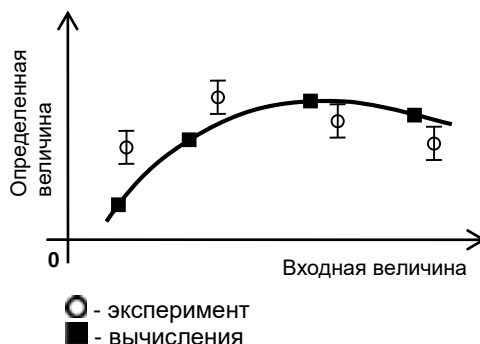
12.1.1. Наглядное представление в отчетной документации неопределенностей, связанных с выполняемым расчетом и моделированием, может быть выполнено многими способами. В данном приложении приведено несколько возможных методов. В зависимости от объема, сложности и ответственности решаемой и наличия необходимой информации задачи может быть выбран один или несколько методов представления из числа приведенных в данном приложении, или использован другой более подходящий.

12.2. Валидационные метрики

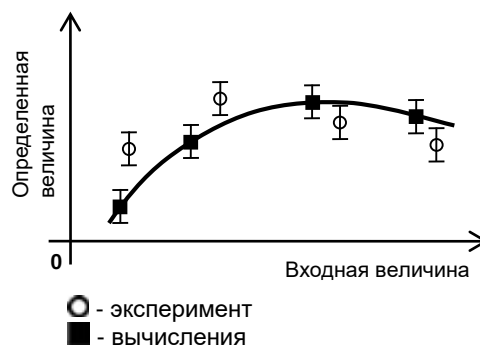
12.2.1. График соответствия результатов моделирования экспериментов – детерминированные значения



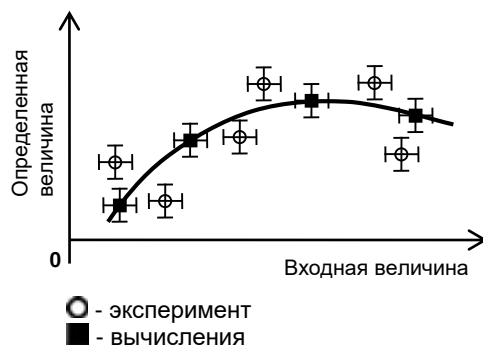
12.2.2. График соответствия результатов моделирования экспериментов – детерминированные значения вычислений, распределение результатов экспериментов



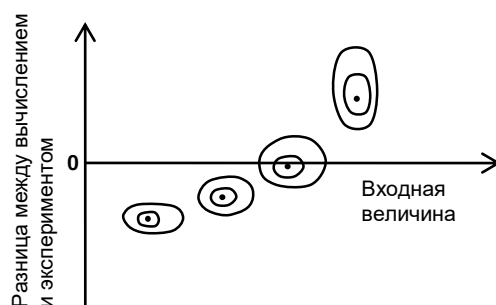
12.2.3. График соответствия результатов моделирования экспериментов – распределение значения вычислений, распределение результатов экспериментов



12.2.4. График соответствия результатов моделирования экспериментов – распределение значения вычислений, распределение результатов экспериментов, распределение параметров вычислений и распределение измеренных значений параметров экспериментов



12.2.5. График распределения разницы между экспериментами и результатами моделирования

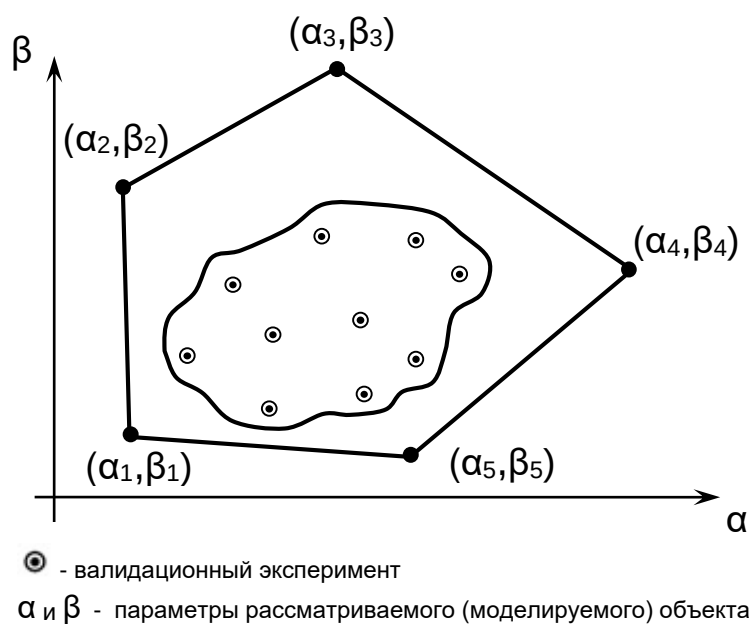


12.3. Области валидации и верификации

12.3.1. При создании вычислительной модели объекта для выполнения оценки расчетчику, применяющему моделирование, необходимо осуществлять экстраполяцию или интерполяцию из состояния «известно» в «неизвестно». Эта экстраполяция/интерполяция должна быть достаточно небольшой, чтобы модель для конкретной оценки оставалась в пределах современного опыта. После экстраполяции/интерполяции расчетчик должен ответить на вопрос: «Достаточно ли эффективна/достоверна модель для поддержания моих выводов по оценке?» Таким образом, расчетчик должен учитывать диапазон верификационных испытаний программного обеспечения, выполненных разработчиком компьютерной программы, и опыт проведения других расчетов, прошедших валидацию, что в комплексе может обеспечить оценку достоверности полученных результатов. Это схематично отражено на рисунке. Границы, изображенные вокруг точек, в реальности нечеткие и многомерные и могут быть многосвязными, неправильными и мало заполненными



12.3.2. На представленной схеме для группы варьируемых параметров моделируемого объекта выполняется изображение области моделирования, и области вокруг значений параметров, для которых есть данные валидационных экспериментов и известны валидационные метрики. Для оценки прогнозирующей способности моделирования с использованием данной модели, возможно использовать аппроксимацию или регрессию значений валидационных метрик в интересующей области.



13. ПРИЛОЖЕНИЕ 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

13.1. Математическая модель

13.1.1. Какой формальный порядок точности математической модели (для возможности сравнения с наблюдаемым порядком точности при верификации моделирования)?

13.2. Документация программного обеспечения

13.2.1. Есть ли техническая документация, описывающая реализованные математические модели и численные методы решения?

13.2.2. Есть ли руководство по валидации? Это отдельный документ или раздел в технической документации?

13.2.3. Есть ли руководство по верификации? Это отдельный документ или раздел в технической документации?