

**ООО «СИТИС»**

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

---

# **Компьютерное моделирование Термины и определения**

---

**Стандарт организации**

**СТО СИТИС-201-16А**

**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. Термины и определения»
2. Обозначение стандарта: СТО СИТИС-201-16А
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» № С9 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](http://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
<b>2. Термины и определения.....</b>	<b>5</b>
2.1. Модели.....	5
2.2. Модели явлений .....	5
2.3. Модели объектов .....	6
2.4. Расчеты и моделирование.....	7
2.5. Инженерная оценка .....	8
2.6. Неопределенность, погрешности, ошибки .....	8
2.7. Валидация, верификация, калибровка .....	9
2.8. Компьютерные программы .....	10
2.9. Отчетная документация .....	11
<b>3. Библиография.....</b>	<b>12</b>
<b>4. Приложение 1. Соотношение моделей и решателей.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Приложение 2. Примеры моделей .....</b>	<b>14</b>
5.1. Пример иерархии моделей.....	14
5.2. Распределение неопределенностей и погрешностей моделей.....	15
5.3. Пример метамоделей.....	16
5.4. Пример экзомоделей.....	17
5.5. Пример квазимоделей.....	18
<b>6. Приложение 3. Типы программ для моделирования.....</b>	<b>19</b>

## **1. Общая часть**

### **1.1. Предисловие**

- 1.1.1. В настоящем стандарте приведено обобщение терминов и определений в области компьютерного моделирования из нескольких применимых международных, отечественных и зарубежных стандартов, а также приведены новые уточняющие термины и их определения
- 1.1.2. При разработке стандарта были рассмотрены применимые стандарты по компьютерному моделированию в разных предметных областях:
  - 1.1.2.1. Пожарная безопасность - ISO 23932:2009, ISO 16730-1:2015
  - 1.1.2.2. Механика твердого тела – ASME V&V 10-2006, ASME V&V 10.1-2012
  - 1.1.2.3. Вычислительная гидродинамика – AIAA G-077-1998, ASME V&V 20-2009, ITTC-7.5-03
  - 1.1.2.4. Компьютерное моделирование и расчеты – NASA-STD-7009, NASA-HDBK-7009, NAFEMS QSS 001, NAFEMS SAFESA
- 1.1.3. При наличии нескольких отличающихся определений одного термина в разных стандартах, как например для терминов «модель», «валидация», «верификация», в данном стандарте приведено то определение, которое наиболее согласуется с другими терминами настоящего стандарта, или приведено новое «обобщающее» определение термина.
- 1.1.4. Для терминов, взятых из других стандартов без изменений, указывается прямая ссылка на этот стандарт, раздел стандарта и номер термина. Если термины в ссылочном стандарте не пронумерованы, то указан порядковый номер термина в соответствующей главе (разделе) стандарта.
- 1.1.5. Для терминов, взятых из других стандартов и измененных при обобщении определения для гармонизации с другими терминами в стандарте, указана ссылка на использованный термин с приставкой «по типу».
- 1.1.6. В определении новых терминов и понятий, приведенных в стандарте, для которых нет аналогов в рассмотренных стандартах, ссылки отсутствуют.
- 1.1.7. При разработке стандарта также были рассмотрены монографии, посвященные вопросам компьютерного моделирования и расчетов, некоторые из которых (часто цитируемые в технических руководствах) приведены в библиографии.

### **1.2. Область применения**

- 1.2.1. Настоящий стандарт устанавливает термины и определения основных понятий по компьютерному моделированию физических систем
- 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 в области компьютерного моделирования, отсутствующих в отечественных национальных и региональных стандартах (ГОСТ Р и ГОСТ), 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»

- 1.2.4. Стандарт разработан применения в следующих областях:
- 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 курсов профессионального обучения
  - 1.2.4.8. В других подобных областях, связанных с компьютерным моделированием физических систем

## 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, свойства материалов, нагрузок и другие подобные параметры, 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** – соподчиненность различных моделей одного и того же реального объекта между собой в зависимости от объема (количества) рассматриваемых и учитываемых явлений и степени их детализации, точности и достоверности определения свойств рассматриваемого объекта.
- 2.1.6. **вложенность (стек) 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. **расчетная схема** – наглядное графическое представление концептуальной модели объекта
- 2.3.5. **математическая модель объекта** - необходимые математические уравнения, граничные значения, начальные условия и исходные данные для описания концептуальной модели объекта. [ASME VV10, Приложение 1, 15]
- 2.3.6. **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]
- 2.3.7. **Домен (domen)** – область пространства, выбранная для выполнения моделирования рассматриваемого явления и представления геометрической формы рассматриваемого объекта
- 2.3.8. **Сетка (mesh)** – дискретное представление домена
- 2.3.9. **Период** – условный период времени, выбранный для моделирования рассматриваемого явления и объекта
- 2.3.10. **Временная последовательность** – дискретное представление периода времени моделирования
- 2.3.11. **Метамодель** – вычислительная модель одного реального объекта, состоящая из вычислительной модели явления, представления пространства и времени объекта доменом и периодом моделирования, и нескольких дискретизаций пространства и времени. При анализе результатов расчетов различных дискретизаций метамодели может быть получена оценка погрешности (неопределенности) численного решения.
- 2.3.12. **Квазимодель** - вычислительная модель одного реального объекта, состоящая из группы альтернативных вычислительных моделей явлений, граничных и начальных условий, и дискретного представления пространства и времени. При анализе результатов расчетов различных вычислительных моделей явлений может быть получена оценка неопределенности (неопределенности) численных моделей явлений для рассматриваемого объекта.
- 2.3.13. **Экзомодель** - вычислительная модель одного реального объекта, состоящая из группы нескольких альтернативных вычислительных моделей явлений, граничных и начальных условий, представления пространства и времени для рассматриваемого

объекта в виде домена и периода моделирования, и нескольких дискретизаций пространства и времени. При анализе результатов расчетов различных вычислительных моделей явлений и различных дискретизаций может быть получена оценка неопределенности (неопределенности) численных моделей явлений и численных решений для рассматриваемого объекта.

## 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 результатов или наборов результатов, полученных при моделировании. [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 параметров 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]
- 2.4.19. **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]
- 2.4.20. **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]

## 2.5. 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 простоту использования. [ASME VV10, Приложение 1, 1]

## 2.6. Неопределенность, погрешности, ошибки

- 2.6.1. **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, применимость информации, физическую изменчивость, случайность или стохастическое поведение, оценки и приближения. [NASA-STD-7009, 3.2, 25]
- 2.6.2. **исчисление неопределенности (uncertainty quantification)** - процесс характеристики всех неопределенностей модели или эксперимента, и количественного определения их влияния на результаты моделирования или экспериментальные результаты. [ASME VV10, Приложение 1, 28]



- 2.6.3. **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]
- 2.6.4. **неснижаемая неопределенность (irreducible uncertainty)** - присущая изменчивость, связанная с моделируемой физической системой. При многих наблюдениях это распределение может быть определено, но оно не может быть устранено. [ASME VV10, Приложение 1, 14]
- 2.6.5. **снижаемая неопределенность (reducible uncertainty)** - потенциальный недостаток, который может быть уменьшен путем сбора большего количества данных, наблюдений, или информации. [ASME VV10, Приложение 1, 22]
- 2.6.6. **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]

## 2.7. Валидация, верификация, 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. **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]
- 2.7.3. **верификация решателя (code verification)** - процесс определения того, что компьютерная программа, реализующая вычислительную модель явления, с достаточной для рассматриваемой задачи точностью представляет математическую модель и численный метод её решения. [по типу NASA-STD-7009, 3.2, 28]
- 2.7.4. **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]
- 2.7.5. **верификация вычислений (calculation verification)** - процесс определения правильности (точности) результатов вычислений [ASME VV10, Приложение 1, 2]
- 2.7.6. **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]
- 2.7.7. **референс (reference)** - данные, теория или информация, с которыми должны быть сопоставлены результаты моделирования. [ASME VV10, Приложение 1, 23]
- 2.7.8. **валидационный эксперимент (validation experiment)** - эксперимент, разработанный и производимый для получения данных с целью валидации модели. [ASME VV10, Приложение 1, 31]
- 2.7.9. **валидационная метрика (validation metric):** математическая мера, которая дает количественную оценку уровня соответствия результатов моделирования результатам экспериментов. [ASME VV10, Приложение 1, 32]
- 2.7.10. **экспериментальные данные (experimental data):** необработанные или обработанные наблюдения (измерения), полученные при проведении эксперимента. [ASME VV10, Приложение 1, 10]

- 2.7.11. **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]
- 2.7.12. **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]

## 2.8. 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. **адаптивный решатель** – программа, реализующая одну математических моделей явлений одним численным методом, выбор временного шага или локальное изменение степени дискретизации сетки осуществляется алгоритмом программы в зависимости от исходных данных и результатов моделирования
- 2.8.4. **Комплексный (пакетный) решатель** – программа, реализующая одну или несколько математических моделей явлений одним или несколькими численными методами
- 2.8.5. **эксрешатель** – 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
- 2.8.6. **метарешатель** – программа, реализующая одним численным методом решение математических уравнений и зависимостей, соответствующих одной концептуальной модели явления для рассматриваемой физической системы, включающая препроцессор для дискретизации (построении сетки) пространства и времени .
- 2.8.7. **проторешатель** – программа, или пакет прикладных программ, реализующие несколько отдельных решателей и/или эксрешателей, которые задаются (выбираются) пользователем для выполнения расчета
- 2.8.8. **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.
- 2.8.9. **препроцессор (preprocessor)** - программа, выполняющая действия по подготовке данных для последующей обработки решателями
- 2.8.10. **постпроцессор (postprocessor)** – программа, выполняющая документирование, визуализацию, обработку и другую подобную интерпретацию результатов численного моделирования, выполненного решателями
- 2.8.11. **контроллер моделирования** – программа, выполняющая действия по подготовке исходных данных для нового моделирования на основании анализа результатов выполненного ранее моделирования
- 2.8.12. **интегрированная среда моделирования** – программа или пакет прикладных программ, имеющая в своем составе решатель (решатели) и один или несколько препроцессоров, постпроцессоров, и контроллеров моделирования
- 2.8.13. **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

2.8.14. **выходные данные** – данные, содержащие результаты выполненного моделирования

2.8.15. **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, моделированию и инженерному анализу, 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. Библиография

- 3.1.1. ASME VV 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics (Руководство по верификации и валидации в вычислительной механике твердых тел)
- 3.1.2. 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)
- 3.1.3. 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)
- 3.1.4. NASA-STD-7009 Standard for Models and Simulations (Стандарт по выполнению расчетов и моделирования)
- 3.1.5. 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)
- 3.1.6. ISO 23932:2009 Fire Safety Engineering – General Principles (Пожарно-технический анализ – Общие принципы)
- 3.1.7. 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)
- 3.1.8. AIAA G-077-1998 (2002) Guide for Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (Руководство по верификации и валидации моделей в вычислительной гидродинамике)
- 3.1.9. ITTC-7.5-03 Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures (Анализ неопределенности в вычислительной гидродинамике, верификация и валидация)
- 3.1.10. NAFEMS QSS 001 Engineering simulation. Quality management systems. Requirements. NAFEMS, 2007 (Инженерное моделирование. Системы менеджмента качества. Требования)
- 3.1.11. SAFESA Management guidelines to structural qualification supported by finite element analysis. NAFEMS, 2005 (Руководство по оценке конструкций с помощью анализа методом конечных элементов)
- 3.1.12. SAFESA Technical Manual, NAFEMS, 2005 (Техническое руководство)
- 3.1.13. Roach P. "Verification and Validation in computational science and engineering", 1998 (Роч П. Верификация и валидация в вычислительной науке и технике)
- 3.1.14. Banks J "Handbook of simulation", 1998 (Бэнкс, Дж. «Руководство по моделированию»)
- 3.1.15. Roach P. "Fundamentals of Verification and Validation", 2009 (Роч П. «Основы верификации и валидации»)
- 3.1.16. Oberkampf W. L. et al. Verification and Validation in Scientific Computing, 2010 (Оберкамф и др. «Верификация и валидация в научных расчетах»)
- 3.1.17. Velten K. "Mathematical modeling and simulation: Introduction for Scientists and Engineers", 2010 (Велтен К. «Математический расчет и моделирование: Введение для научных сотрудников и инженеров»)

#### 4. Приложение 1. Соотношение моделей и решателей

4.1.1. Таблица соотношения моделей явлений и объектов, решателей и исходных данных моделирования, параметров моделей и решателей приведена ниже.

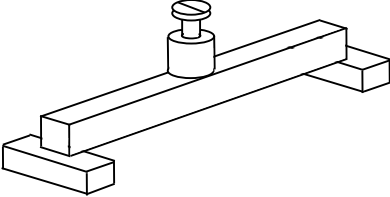
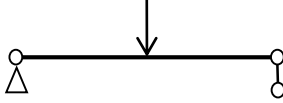
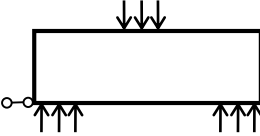
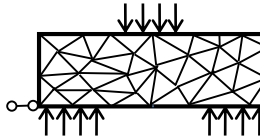
4.1.2. Знак «\*» в колонке «Параметры» таблицы означает, что для данного уровня (типа) представления модели могут быть и как правило есть один или несколько параметров, влияющих на результат моделирования.

4.1.3.

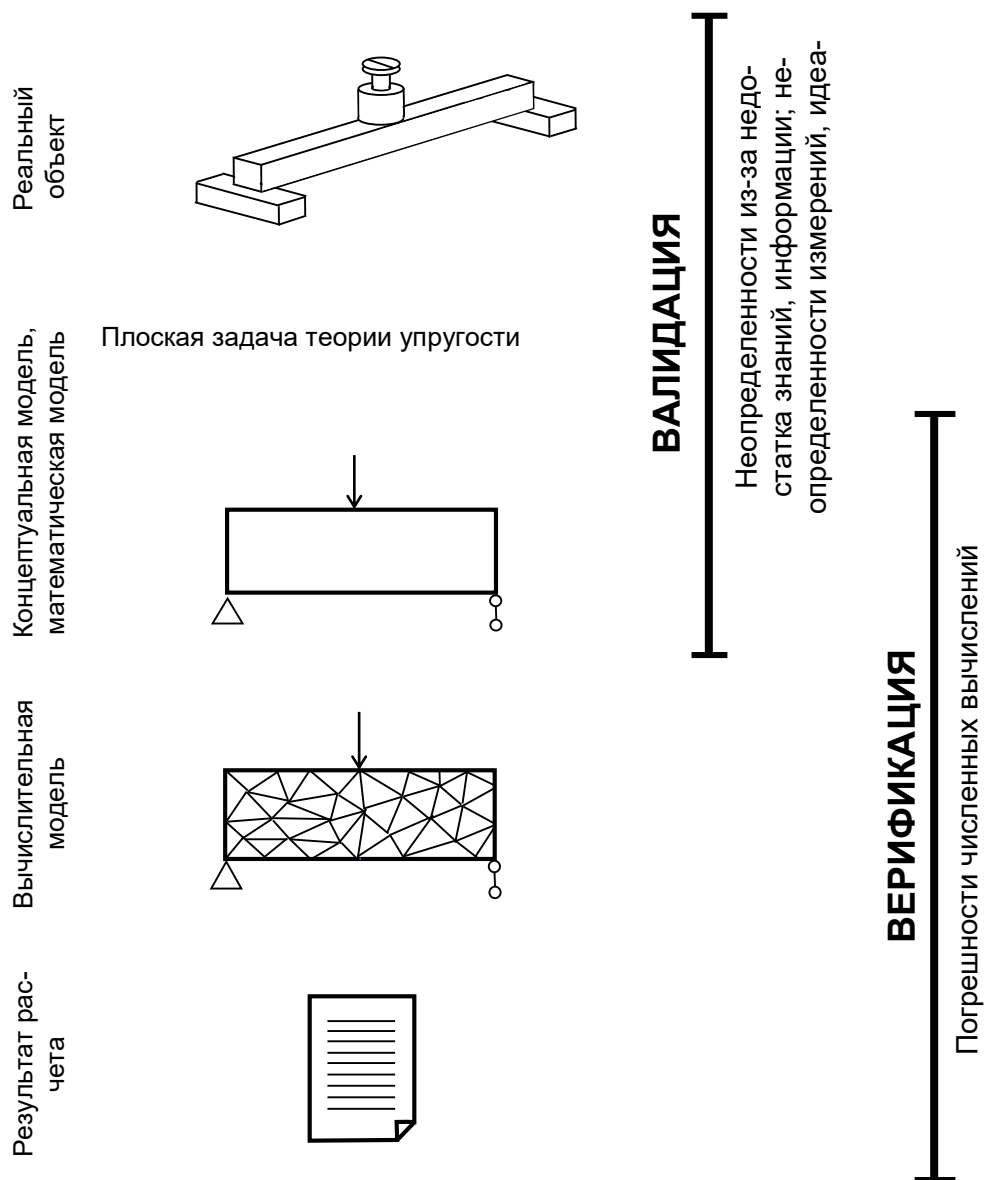
	Термин (понятие)	Название (классификация) вычислительной модели объекта	Представление явления	Параметр модели	Параметр численного метода	Представление пространства	Представление времени
1	Реальный объект (физическая система)		Наблюдаемые явления			Реальное пространство	Реальное время
2	Концептуальная модель явления		Выбранные при инженерном анализе явления, принятые допущения			Реальное пространство	Реальное время
3	Математическая модель явления		Уравнения и зависимости	*		Трёхмерное евклидово пространство	Одномерное евклидово пространство
4	Вычислительная модель явления		решатель	*	*	Дискретное представление пространства	Дискретное представление времени
5	Вычислительная модель объекта	модель	Решатель	*	*	Сетка	Временная последовательность
6		метамодель	метарешатель	*	*	Домен	Период
7		экзомодель	экзорешатель	*	*	Домен	Период
8		квазимодель	экзорешатель	*	*	Сетка	Временная последовательность

## 5. Приложение 2. Примеры моделей

### 5.1. Пример иерархии моделей

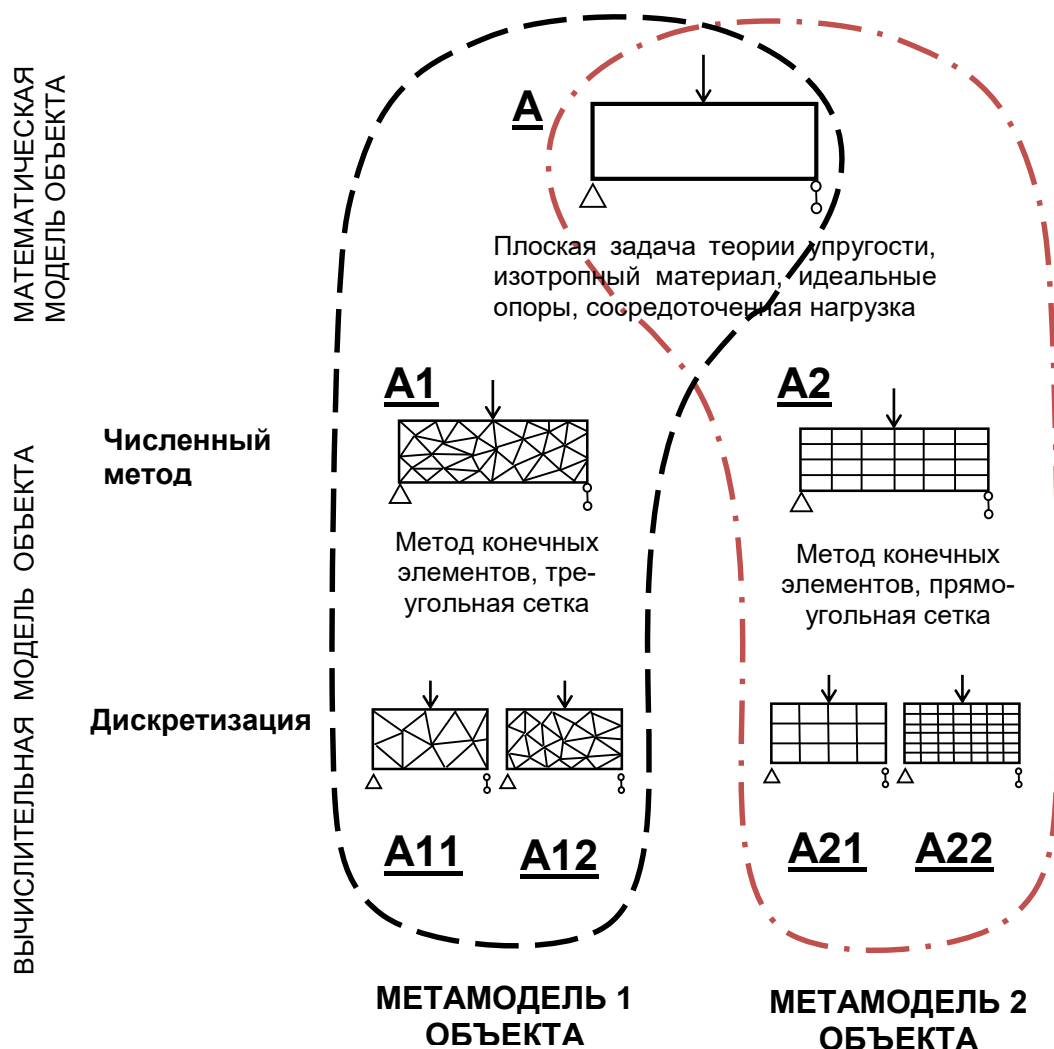
<p><b>Реальный объект (физическая система)</b></p>		
<p><b>Концептуальная модель явления</b></p>	<p>Сопротивление материалов, изгиб упругого стержня</p>	<p>Теория упругости, деформирование изотропного материала</p>
<p><b>Расчетная схема</b></p>		
<p><b>Математическая модель явления</b></p>	$1/\rho = \frac{M_x}{EJ_x}$	$\frac{\delta\sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{xy}}{\delta x} + Y = 0$ $\frac{\delta\sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta\tau_{xy}}{\delta y} + X = 0$
<p><b>Вычислительная модель объекта</b></p>	<p>Аналитическое решение</p> $y = \frac{4x^2 - 3L^2}{48EJ_x}$	<p>Решение уравнения методом конечных элементов на треугольной сетке</p> 

## 5.2. Распределение неопределенностей и погрешностей моделей



### 5.3. Пример метамодели

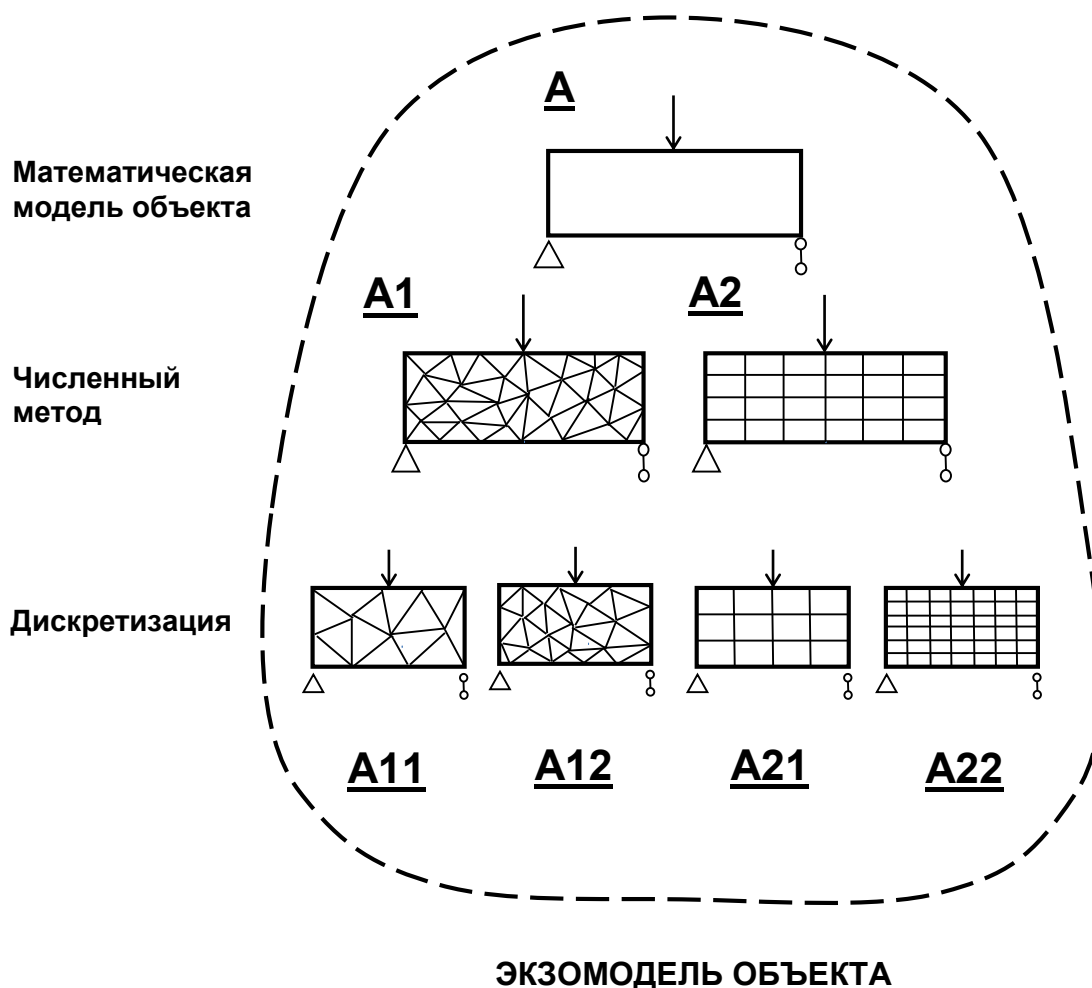
- 5.3.1. Для задачи определения напряженно-деформированного состояния условного реального объекта выбрана математическая модель объекта «А», например уравнения теории упругости для тела из изотропного материала, с идеальными недеформируемыми опорами и точечным приложением сосредоточенной нагрузки.
- 5.3.2. Для решения уравнений модели «А» используется два численных метода: метод «А1» - метод конечных элементов с аппроксимацией треугольными конечными элементами, и метод «А2» - метод конечных элементов с аппроксимацией четырехугольными конечными элементами
- 5.3.3. Для выполнения расчетов для каждого численного метода использованы две дискретизации формы объекта – вычислительные модели объектов с сетками «А11» и «А12» для метода «А1», и «А21» и «А22» для метода «А2»
- 5.3.4. Совокупность моделей «А11» и «А12» является метамоделью рассматриваемого объекта. Совокупность моделей «А21» и «А22» является другой метамоделью рассматриваемого объекта для другого численного метода решения уравнений математической модели.
- 5.3.5. При анализе результатов моделирования для разных моделей в метамодели возможно оценивать погрешности численных методов, связанные с дискретизацией





## 5.4. Пример экзомодели

- 5.4.1. Для задачи определения напряженно-деформированного состояния условного реального объекта выбрана математическая модель объекта «А», например уравнения теории упругости для тела из изотропного материала, с идеальными недеформируемыми опорами и точечным приложением сосредоточенной нагрузки.
- 5.4.2. Для решения уравнений модели «А» используется два численных метода: метод «А1» - метод конечных элементов с аппроксимацией треугольными конечными элементами, и метод «А2» - метод конечных элементов с аппроксимацией четырехугольными конечными элементами
- 5.4.3. Для выполнения расчетов для каждого численного метода использованы две дискретизации формы объекта – вычислительные модели объектов с сетками «А11» и «А12» для метода «А1», и «А21» и «А22» для метода «А2»
- 5.4.4. Совокупность моделей «А11», «А12», «А21» и «А22» является экзомоделью рассматриваемого объекта.
- 5.4.5. При анализе результатов моделирования для разных моделей в экзомодели возможно оценивать неопределенности математических моделей и погрешности численных методов



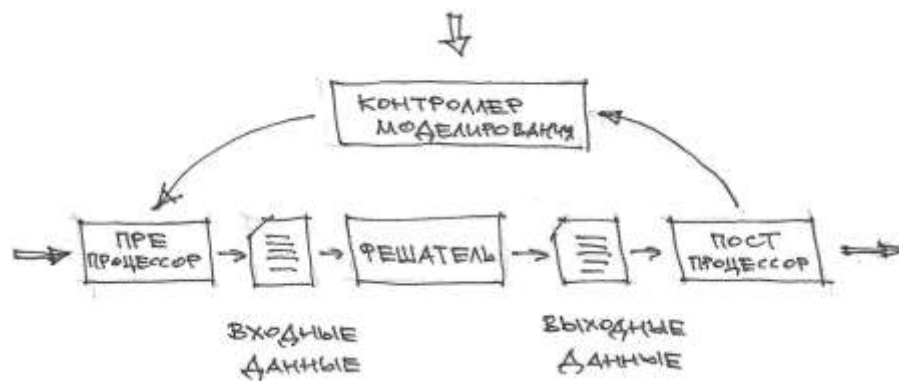
## 5.5. Пример квазимодели

- 5.5.1. Для исследования реального объекта выбрана некоторая математическая модель объекта.
- 5.5.2. Для решения уравнений модели используется некоторая дискретизация, например сетка треугольных конечных элементов.
- 5.5.3. С использованием заданной сетки реализуются два разных численных метода решения математических зависимостей математической модели объекта, например две реализации метода в разных программных комплексах.
- 5.5.4. Совокупность вычислительных моделей (результатов расчета в разных программных комплексах) для одной математической модели и одинаковой дискретизации, является квазимodelью рассматриваемого объекта.
- 5.5.5. При анализе результатов моделирования для разных моделей в квазимodelи возможно оценивать погрешности численных методов



## 6. Приложение 3. Типы программ для моделирования

6.1.1. На представленной схеме 1 показаны различные типы программ и их место в процессе моделирования.



6.1.2. На схеме 2 показаны некоторые варианты состава программ для моделирования, являющихся интегрированной средой моделирования. Варианты условно обозначены А, Б и В. Возможны другие варианты компоновки в зависимости от количества используемых решателей, программ подготовки и обработки данных и их сочетаний.

