

**О. В. Томилова  
П. В. Кауров**

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН  
И ОБОРУДОВАНИЯ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2024**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«Санкт-Петербургский государственный университет**  
**промышленных технологий и дизайна»**  
**Высшая школа технологии и энергетики**

**О. В. Томилова**  
**П. В. Кауров**

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ**  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**  
**И ОБОРУДОВАНИЯ**

**Учебное пособие**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург  
2024

**УДК 62-5 (075)**

**ББК 32.965я7**

**T564**

*Рецензенты:*

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова (СПбГЛТУ)

*А. В. Теплов;*

кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии машиностроения Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна

*А. Н. Евдокимов*

**Томилова, О. В.**

**T564** Автоматизированное проектирование технологических машин и оборудования: учебное пособие / О. В. Томилова, П. В. Кауров. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 42 с.

ISBN 978-5-91646-402-3

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Автоматизированное проектирование технологических машин и оборудования» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование». В пособии рассмотрены концепции цифровых двойников, математические и компьютерные модели, мультидисциплинарные модели, верификация и валидация моделей, а также многоуровневая система требований и цифровые испытания.

Особое внимание в пособии уделяется практическим аспектам, таким как использование программно-технологических платформ для создания цифровых моделей, а также проведение виртуальных испытаний на цифровых стендах и полигонах. Это делает пособие не только теоретическим руководством, но и практическим инструментом для реализации проектов в области проектирования технологических машин.

УДК 62-5 (075)

ББК 32.965я7

ISBN 978-5-91646-402-3

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

© Томилова О. В., Кауров П. В., 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Концепция цифровых двойников.....	5
Становление цифрового двойника.....	6
Системный подход к цифровым двойникам.....	8
Цифровые двойники изделий.....	9
Исследование и типологизация цифровых двойников в высокотехнологичной промышленности.....	10
Изделие в машиностроении .....	12
Цифровые технологии в проектировании и производстве: ключевые аспекты и инструменты .....	13
Цифровой двойник изделия и системный инжиниринг .....	15
Многоуровневая система требований .....	16
Математические и компьютерные модели.....	17
Математическая модель: определение, виды и применение.....	19
Эволюция математического и компьютерного моделирования.....	20
Компьютерная модель и ее роль в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий .....	25
Мультидисциплинарное моделирование и его значение в инженерии.....	26
Понятие адекватности модели в инженерном моделировании.....	27
Введение в верификацию моделей: понятия и значимость .....	29
Процесс верификации модели.....	29
Погрешности при моделировании .....	31
Расчет прочности балки в САПР Компас-3D.....	32
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	41

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цифровые двойники изделия являются одним из ключевых инновационных подходов, преобразующих традиционные методы проектирования, производства и эксплуатации продуктов. Этот концепт, возникший в контексте цифровой трансформации и развития технологий, представляет собой виртуальные модели реальных физических объектов или систем, которые точно отражают их характеристики, поведение и состояние в реальном времени.

Цифровые двойники изделия обеспечивают возможность создания виртуальных аналогов реальных объектов или процессов, что позволяет проводить разнообразные анализы, испытания и оптимизации без необходимости физического прототипирования. Они могут быть использованы на всех этапах жизненного цикла продукта – от проектирования и разработки до производства, эксплуатации и обслуживания.

В данной работе мы рассмотрим ключевые аспекты цифровых двойников изделия, их применение в различных отраслях, а также выявим преимущества и вызовы, с которыми сталкиваются организации при внедрении этой инновационной технологии.

# КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

## Многообразие цифровых двойников

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в области цифровых технологий, что приводит к существенным изменениям в функционировании как отдельных компаний, так и целых отраслей экономики. Эти процессы изменений называются цифровой трансформацией. Они опираются на развитие различных цифровых технологий, таких как искусственный интеллект и машинное обучение, интернет вещей, большие данные, технологии распределенного реестра и блокчейн, робототехника и квантовые технологии, виртуальная и дополненная реальность, предиктивная аналитика, нейротехнологии и фотоника. Одним из ключевых элементов в этом процессе являются цифровые двойники, которые представляют собой модели или копии реальных объектов, процессов или систем.

Термин «цифровой двойник» используется в различных контекстах и имеет множество синонимов, таких как цифровой близнец, клон, аватар, кузен, образец, виртуальный двойник, гибридный двойник и другие. Это отражает неустоявшуюся терминологию и разнообразие подходов к данному понятию. В рамках данного курса мы будем использовать термин «цифровой двойник» как наиболее распространенный и понятный.

Популярность и интерес к цифровым двойникам отмечается не только в индустрии, но и в научном сообществе. Количество запросов и научных публикаций по этой теме значительно возросло за последние годы. Это свидетельствует о росте интереса к данной теме и ее значимости для современных технологических исследований и разработок.

Однако стоит отметить, что существует различие в понимании термина «цифровой двойник» и его роли в различных областях исследований. Поэтому важно учитывать контекст и специфику применения этого термина в различных отраслях и областях деятельности.

При поиске в открытых источниках по запросу «цифровой двойник» (Digital Twin) можно найти множество понятий, которые используются в качестве синонимов термину «цифровой двойник», в их числе:

- Цифровой двойник / дублер (Digital Double);
- Цифровой близнец (Digital Twin);
- Цифровой клон (Digital Clone);
- Цифровой аватар (Digital Avatar);
- Цифровой кузен (Digital Cousin);
- Цифровой образец / мастер (Digital Master);
- Виртуальный двойник (Virtual Twin);
- Гибридный двойник (Hybrid Twin);
- Электронный двойник и др.

Наличие такого многообразия свидетельствует о неустоявшейся терминологии.

Авторы национального стандарта РФ ГОСТ Р 57700.37-2021 «Цифровой двойник» считают наиболее верной трактовку термина «цифровой двойник» (Digital Twin).

## СТАНОВЛЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Основоположник концепции цифровых двойников, профессор Майкл Гривс, отмечает, что идея цифровых двойников имеет свои корни в использовании людьми своего ментального пространства для моделирования объектов. Вместо виртуального пространства люди использовали свои мысли и идеи для представления объектов. Однако делиться этими идеями было не всегда просто, так как у человека ограничены возможности для вычислений в уме по сравнению с компьютерами.

С течением времени эти «идейные двойники» эволюционировали в математические модели, которые описывали объекты реального мира или их свойства с разной степенью точности. Эти математические модели стали основой для создания цифровых двойников.

Профессор Гривс [1] также подчеркивает, что цифровые двойники могут быть использованы для управления жизненным циклом продукта (Product Lifecycle Management, PLM) путем создания виртуального пространства, которое дублирует реальное. Это виртуальное пространство взаимодействует с реальным благодаря потокам данных, переносящим информацию между физическим и виртуальным мирами.

В своих работах профессор Гривс также выделяет три основных компонента концепции цифровых двойников: реальный продукт в реальном окружении, виртуальный продукт в виртуальном окружении и данные, связывающие реальный и виртуальный продукты.

Процесс развития концепции цифровых двойников можно разделить на четыре стадии: первая стадия – существует только реальный объект или процесс; вторая стадия – появляется цифровая версия реального объекта или процесса; третья стадия – появляется связь между реальным объектом и его цифровой версией; четвертая стадия – реальный объект и его цифровая версия начинают сближаться и пересекаться.

Согласно оценкам экспертов, на сегодняшний день происходит переход к началу четвертой стадии развития концепции цифровых двойников. Это свидетельствует о том, что технология цифровых двойников продолжает развиваться и становится более сложной и универсальной.

Существует еще одна промежуточная стадия между первой и второй стадиями развития концепции цифровых двойников. На этой стадии физический объект имеет свой физический двойник, на котором воспроизводятся те же условия, что и у реального объекта.

Примером такой реализации идеи «физического двойника» является ситуация с космическим кораблем «Аполлон-13», который направлялся к Луне в 1970 году [2, 3]. После взрыва кислородного бака в служебном отсеке корабля, руководители полета в NASA оперативно провели диагностику причин происшествия и разработали алгоритм безопасного возвращения космического корабля на Землю.

Для проверки вариантов действий экипажа по маневрированию и возвращению корабля на Землю, специалисты NASA использовали около 15 различных тренажеров, расположенных на Земле. Эти тренажеры были перепрограммированы, чтобы точно повторять конфигурацию «Аполлон-13» после аварии. Также специалисты NASA привлекли дублирующий экипаж для проверки вариантов действий на Земле, прежде чем они были направлены на корабль. В итоге, благодаря подготовке на тренажерах и оперативным действиям экипажа, астронавты успешно вернулись на Землю.

На основе полученных данных был усовершенствован «Аполлон-14» и, в частности, модифицирован кислородный бак.

Таким образом, проект по устранению последствий аварии в отсеке космического корабля «Аполлон-13» стал отправной точкой для развития концепции цифрового двойника. Работа специалистов NASA продемонстрировала принцип действия «двойников».

Успех работы команды связан с применением программного и аппаратного обеспечения. Такие технологии впервые активно применились в аэрокосмической отрасли и позволили моделировать ситуации, которые невозможно было воспроизвести опытным путем. Возможности компьютерного проектирования и моделирования способствовали расширению областей применения цифровых двойников, включая другие высокотехнологичные промышленные секторы.

Профессор Майкл Гривс и его коллеги из NASA и Мичиганского университета развили идею цифровых двойников в своих работах, внедряя ее в различные области промышленности и науки.



Рисунок 1 – Становление и развитие технологии цифровых двойников с 1960 по 2019 гг. (Источник: Прохоров А., Лысачев М. [4])

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКАМ

Современные подходы к понятию «цифровой двойник» могут быть рассмотрены системно с трех сторон: уровней анализа, стадий жизненного цикла и используемых технологий. Анализируя эволюцию концепции цифровых двойников и практику инженерной работы, можно выделить переход от простых к сложным и масштабным объектам и процессам.

Первый подход к рассмотрению цифровых двойников основан на уровнях анализа, которые могут включать в себя компоненты, изделия, цеха, технологические процессы, предприятия, здания, города и крупные объекты инфраструктуры.

Второй подход связан с жизненным циклом продуктов или объектов, где цифровые двойники могут создаваться на всех этапах – от разработки до утилизации.

Третий подход к рассмотрению цифровых двойников фокусируется на используемых технологиях. На разных стадиях жизненного цикла и для разных объектов могут применяться различные технологии, такие как цифровое проектирование, моделирование, анализ больших данных, искусственный интеллект, дополненная и виртуальная реальность, промышленный интернет вещей и другие.

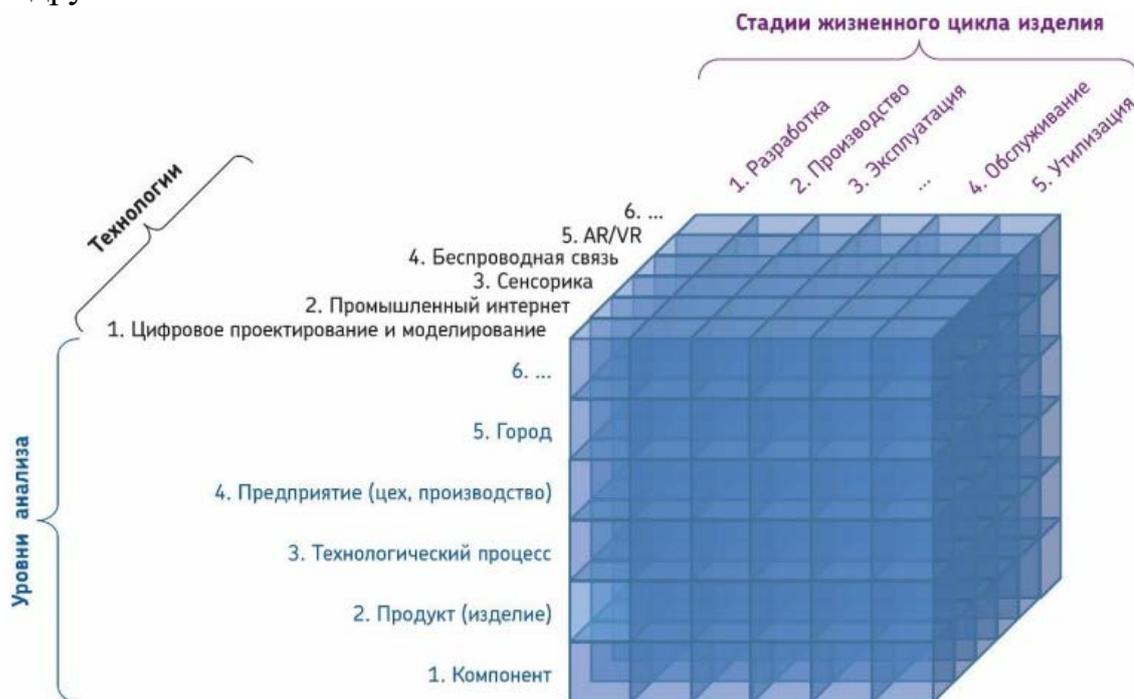


Рисунок 2 – Три стороны системного рассмотрения цифрового двойника (Источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам статьи «Defining Digital Twin» [5])

Важно отметить, что для многих авторов и организаций важным аспектом является использование определенных технологий при создании цифровых

двойников, и отсутствие некоторых технологий может исключать объект из категории цифровых двойников.

Таким образом, эволюция цифровых двойников связана не только с развитием самих объектов и процессов, но и с применяемыми технологиями, которые позволяют создавать все более точные и полезные модели реальных объектов.

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ

### Типология определений цифрового двойника

Подходы к типологизации определений цифрового двойника несут условный характер, поскольку процесс формирования данного термина еще продолжается. Термин «предтермин» применяется для новых понятий, не отвечающих основным требованиям термина: однозначности, точности, отсутствия синонимов и т. д.

Различные организации и учреждения предлагают свои варианты определений цифрового двойника, которые зависят от сферы деятельности, направления научных исследований, опыта автора и уровня развития технологий. Существует широкий спектр трактовок, начиная от общего понимания цифрового двойника как любой цифровой копии объекта до научно-технического определения, учитывающего ряд строгих требований.

Несмотря на широкий диапазон трактовок, первое, самое широкое определение, лишено практической значимости, так как не добавляет ничего нового к уже существующим терминам. Другое определение, учитывающее жесткие требования к цифровому двойнику, характеризует его как решение, которое пока еще не реализовано в современной практике.

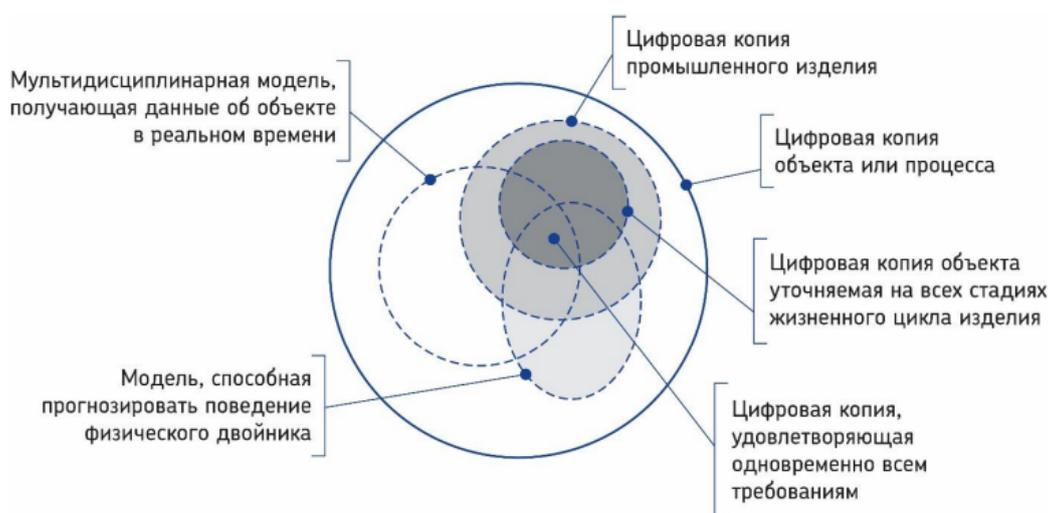


Рисунок 3 – Границы понятия цифрового двойника в современных публикациях: Центр НТИ СПбПУ по материалам [6]

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ТИПОЛОГИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специалисты Центра компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого провели исследование на основе обзора публикаций мировых лидеров, научно-исследовательских организаций и экспертного практического опыта специалистов. Целью исследования было разработать варианты типологизации термина «цифровой двойник» на основе анализа определений, представленных в различных публикациях.

Первый вариант типологизации основан на моменте появления цифрового двойника относительно реального объекта или процесса. Существует несколько подходов к этому термину. Некоторые определения предполагают, что цифровой двойник должен быть создан до появления физического объекта, в то время как другие утверждают, что цифровой двойник существует только после начала эксплуатации физического объекта. Некоторые трактовки допускают оба подхода. Например, по мнению CIMdata, цифровой двойник – это виртуальное представление реального объекта, обладающее необходимой точностью для прогнозирования и оптимизации его производительности в течение всего жизненного цикла.

Второй вариант типологизации основан на уровне адекватности цифрового двойника реальному объекту или процессу. Определения цифрового двойника также можно рассмотреть с точки зрения подходов к разработке математических и компьютерных моделей с высоким уровнем адекватности. Некоторые определения утверждают, что уровень адекватности модели должен быть достигнут до ввода реального объекта в эксплуатацию, в то время как другие предполагают уточнение модели на стадии эксплуатации на основе реальных данных.

ESI Group использует несколько терминов для обозначения цифровой копии продукта – Virtual Twin, Digital Twin, Hybrid Twin (виртуальный двойник, цифровой двойник, гибридный двойник).

Под виртуальным двойником (Virtual Twin) в трактовке ESI понимаются традиционные численные модели, которые создаются «офлайн» на основе знаний физических законов и не используют данные, полученные от реального объекта.

Цифровой двойник (Digital Twin) в ESI представляет собой модели, построенные на основе данных, полученных с датчиков реального объекта, что позволяет повысить точность моделирования до необходимого уровня.

Гибридный двойник (Hybrid Twin) включает в себя как виртуальный, так и цифровой двойники. ESI выделяет несколько направлений применения гибридных двойников, таких как гибридные двойники оборудования и производственных линий, а также продуктов в эксплуатации.

Третий вариант типологизации основан на целях применения цифровых двойников. Это отражается в различиях в определениях, связанных с информационно-диагностическими, предиктивными, качественными и операционными цифровыми двойниками. Несмотря на различные подходы к определению цифрового двойника, все они указывают на то, что это комплекс технологий и решений для обеспечения жизненного цикла продукта или системы.

### **ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»**

Основой для разработки национального стандарта стал подход Physics Driven, который используется в новом стандарте ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». Этот стандарт был утвержден 16 сентября 2021 года и введен в действие с 1 января 2022 года.

Стандарт ГОСТ Р 57700.37–2021 является единственным в мире национальным нормативным документом, посвященным цифровым двойникам, созданным на основе высокоточного системного инженерного моделирования. Он определяет цифровые двойники как комплекс технологий и решений для обеспечения жизненного цикла продукта или системы.

Стандарт был разработан специалистами Центра НТИ СПбПУ совместно со специалистами ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» при активном участии представителей 25 отечественных высокотехнологичных предприятий и институтов. Он распространяется на изделия машиностроения и определяет общие положения создания цифровых двойников как для новых, так и для уже существующих изделий.

Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия и зависит от этой стадии. В рамках стандарта были введены 11 новых терминов, связанных с цифровыми двойниками:

1. Адекватность модели.
2. Валидация модели изделия.
3. Валидация программного обеспечения компьютерного моделирования.
4. Верификация программного обеспечения компьютерного моделирования.
5. Многоуровневая система требований.
6. Сертификация программного обеспечения компьютерного моделирования.
7. Цифровая модель изделия.
8. Цифровой двойник изделия.
9. Цифровой (виртуальный) испытательный полигон.
10. Цифровой (виртуальный) испытательный стенд.
11. Цифровые (виртуальные) испытания.

В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021, цифровой двойник изделия представляет собой систему, состоящую из цифровой модели изделия и информационных связей с самим изделием или его составными частями.

Кроме того, стандарт рекомендует использовать программно-технологическую платформу цифровых двойников при создании и применении цифровых двойников изделий на всех этапах их жизненного цикла.

## **ИЗДЕЛИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Производство играет ключевую роль в экономике, обеспечивая создание товаров и услуг для удовлетворения потребностей общества. Одной из основных отраслей производства и экономики в целом является промышленность.

Развитая промышленность способствует научно-техническому прогрессу, улучшает благосостояние населения и обеспечивает технологическую независимость страны. Одним из важнейших секторов промышленности является машиностроение, которое тесно связано с другими отраслями, обеспечивая их стабильное функционирование и развитие технологического ядра промышленности и экономики.

В машиностроении преобладает дискретный тип производства, при котором производятся отдельные изделия, такие как автомобили, приборы, компьютеры и другие. Оценка и гарантирование качества изделий машиностроения возможны лишь при наличии соответствующих характеристик и показателей, а также требований, закрепленных в государственных стандартах.

Согласно ГОСТ 2.101–2016, изделие определяется как предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации по конструкторской документации. Изделия могут включать в себя устройства, машины, агрегаты, оборудование и другие предметы производства, а их количество измеряется в штуках. К изделиям также могут относиться как завершенные, так и незавершенные предметы производства, включая заготовки.

Подробнее с видами изделий можно ознакомиться в разделе 5 ГОСТ 2.101–2016.

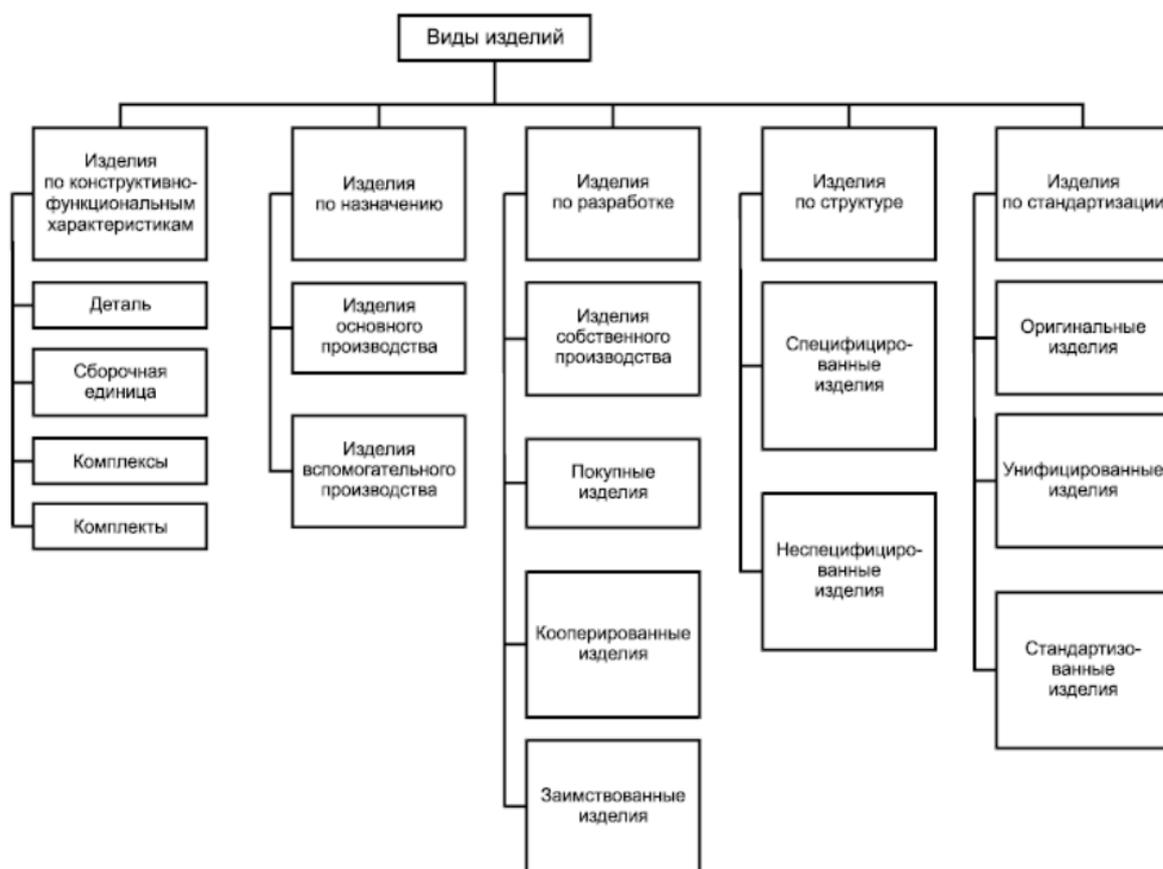


Рисунок 4 – Классификация видов изделий (Источник: ГОСТ 2.101 – 2016)

## **ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ: КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ И ИНСТРУМЕНТЫ**

Сегодня в высокотехнологичных компаниях основная часть изменений сосредоточена на этапе разработки продуктов, где определяются их ключевые преимущества и учитываются требования последующих этапов жизненного цикла, таких как производство и эксплуатация. Применение такого подхода позволяет сократить количество изменений, вносимых в конструкцию при производстве и испытаниях опытных образцов, что помогает уменьшить издержки и ускорить вывод продукции на рынок. Это стало возможным благодаря развитию и внедрению передовых цифровых и производственных технологий, таких как технологии цифрового проектирования и моделирования. Эти технологии включают в себя компьютерное проектирование (Computer-Aided Design, CAD), математическое моделирование и инжиниринг, технологии управления данными о продукте (Product Data Management, PDM) и управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM). Они помогают компаниям создавать более конкурентоспособные и персонализированные продукты нового поколения, оптимизируя производственные процессы и управление данными.

Для более подробного обзора важно отметить роль каждой из указанных технологий:

1. Компьютерное проектирование (CAD) – это процесс создания трехмерных моделей изделий с использованием специализированных программных систем. CAD позволяет инженерам создавать, редактировать и анализировать детали продукта перед его физическим созданием.

2. Математическое моделирование и инжиниринг (CAE и HPC) – Эти технологии включают в себя компьютерное моделирование и анализ различных аспектов продукта, таких как его поведение в различных условиях эксплуатации, механические и тепловые свойства. Суперкомпьютеры (HPC) играют важную роль в обработке и анализе огромных объемов данных, что позволяет инженерам проводить сложные расчеты и оптимизировать процессы.

3. Технологическая подготовка процесса производства, ориентированная как на формирование управляющих программ станков с ЧПУ (Computer-Aided Manufacturing, CAM), так и на моделирование технологических процессов аддитивного производства (Computer-Aided Additive Manufacturing, CAAM).

4. CAM-системы – программные системы технологической подготовки производства, позволяющие на основе 3D-моделей, полученных из CAD-систем, осуществлять разработку управляющих программ для изготовления изделий на оборудовании с ЧПУ.

CAAM-системы – специализированные программные системы, обеспечивающие процесс обработки, исправления геометрии и подготовки 3D-моделей, полученных из CAD/CAE-систем, для аддитивного производства.

5. Бионический дизайн (Simulation & Optimization), (Driven Bionic Design) – процесс проектирования и производства в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и кастомизированной /персонализированной продукции нового поколения на основе применения цифровых технологий, компьютерного инжиниринга, оптимизации (многопараметрической, топологической, многокритериальной, мультидисциплинарной и др.) и передовых производственных технологий, в первую очередь аддитивных технологий, когда получаемые оптимальные инженерные решения (то есть изделия) напоминают структуры, встречающиеся в живой природе.

6. Технологии управления данными о продукте (PDM). PDM помогает компаниям организовывать и управлять данными, связанными с продуктом, включая чертежи, спецификации, структуры сборки и другую информацию. Это обеспечивает централизованный доступ к актуальным данным и облегчает совместную работу различных отделов компании.

7. Управление жизненным циклом изделий (PLM). PLM представляет собой комплекс решений для управления всем жизненным

циклом продукта, начиная с идеи и заканчивая утилизацией. PLM помогает оптимизировать процессы проектирования, производства, управления изменениями, совместной работы и управления качеством.

Вместе эти технологии обеспечивают компаниям возможность эффективно создавать и управлять продуктами от концепции до утилизации, снижая издержки, улучшая качество и ускоряя время вывода продукции на рынок.

## **ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ИЗДЕЛИЯ И СИСТЕМНЫЙ ИНЖИНИРИНГ**

В процессе создания цифрового двойника изделия важно применять передовые технологии, чтобы обеспечить его высокий уровень качества и соответствие мировым стандартам. Однако, если использовать технологии, не соответствующие лучшим практикам в данном классе задач, это может негативно сказаться на качестве изделия. Среди ключевых технологий в этом процессе занимает важное место математическое моделирование, которое позволяет описывать поведение изделия в различных условиях и обеспечивать выполнение требований к нему. Для решения уравнений математической физики применяются численные методы, что позволяет решать сложные инженерные задачи и обеспечивать необходимую точность расчетов. Системный инжиниринг и MBSE-подход становятся все более важными при разработке сложных систем, так как позволяют учитывать множество параметров и взаимосвязей между компонентами системы на ранних стадиях разработки.

Для разработки сложных инновационных изделий, состоящих из различных подсистем и компонентов, применяются методы системного инжиниринга. Основой такого подхода является использование компьютерных моделей и моделирования вместо традиционной документации и статических чертежей. Этот метод, известный как модельно-ориентированный системный инжиниринг (MBSE), предполагает создание моделей для каждого компонента разрабатываемого изделия, которые взаимодействуют между собой. MBSE (ModelBased Systems Engineering) позволяет контролировать выполнение требований к продукции на протяжении всего ее жизненного цикла, обеспечивая улучшение конкурентоспособности изделия в целом. Это достигается путем постоянного следования за всеми компонентами системы и их взаимодействием, чтобы избежать ситуаций, когда улучшение одних характеристик приводит к ухудшению других, что может негативно сказаться на конечном качестве и конкурентоспособности продукта.

Таким образом, модельно-ориентированный системный инжиниринг позволяет создавать более сбалансированные и оптимизированные решения, учитывая разнообразные требования и ограничения. Он обеспечивает более глубокое понимание взаимосвязей между компонентами системы и позволяет предотвращать нежелательные эффекты, которые могут возникнуть в процессе разработки.

Важно отметить, что MBSE улучшает эффективность процесса разработки, позволяя выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях и проводить необходимые корректировки еще до того, как будет создан физический прототип изделия. Это позволяет сократить затраты на разработку и время до вывода продукта на рынок, что, в свою очередь, способствует увеличению конкурентоспособности и успеху на рынке.

## **МНОГОУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ТРЕБОВАНИЙ**

Многоуровневая система требований играет ключевую роль в разработке конкурентоспособных изделий, состоящих из различных компонентов и подсистем. Эта система позволяет учитывать разнообразные требования, установленные в техническом задании, а также оценивать их взаимное влияние и возможные противоречия.

Для организации требований и целевых показателей часто применяется матричный формат. По мере уточнения требований, матрица заполняется и дополняется, что позволяет оперативно управлять изменениями в процессе разработки.

Для проверки взаимодействия компонентов и подсистем применяются цифровые испытания на виртуальных испытательных стендах и полигонах. Эти испытания позволяют оценить достижение установленных целевых показателей и выявить возможные противоречия. При необходимости вносятся изменения в систему, и процесс повторяется до достижения оптимального решения.

Цифровые испытания генерируют полезные данные, которые анализируются и используются как в рамках текущего проекта, так и для будущих разработок. Кроме того, данные из реальных испытаний опытных образцов также анализируются с учетом требований системы.

Таким образом, процесс разработки цифрового двойника изделия позволяет создавать оптимальные и конкурентоспособные решения, учитывая множество требований и ограничений, предъявляемых к продукту.

Цифровые двойники используются для анализа больших объемов данных и обеспечиваются программно-технологической платформой, которая включает несколько компонентов:

1. Средства управления программным обеспечением компьютерного моделирования.
2. Средства управления проектами.
3. Средства для сбора, обработки, анализа, визуализации, каталогизации, хранения и передачи компьютерных моделей и результатов компьютерного моделирования.
4. Средства отслеживания всех изменений конструкторских и технологических решений, а также модификаций компьютерных моделей и вариантов инженерных расчетов.

5. Средства оформления результатов.
6. Средства защиты данных и организации совместной работы участников проекта в соответствии с правами доступа.
7. Средства компьютерного моделирования для планирования применения изделия, его технического обслуживания и ремонта.

Цифровая платформа также создает и поддерживает цифровую модель изделия, которая является агрегатором всех знаний и данных о разрабатываемом продукте. Эта модель обеспечивает двусторонние информационные связи с изделием, формируя цифровой двойник изделия, если само изделие уже существует.

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ**

Модели представляют собой абстрактные сущности, которые воспроизводят явления, объекты или их свойства в реальном мире. Они приближенно описывают моделируемый объект, сохраняя его существенные черты и основные свойства. Моделирование позволяет изучать и анализировать объекты, не прибегая к их физическому созданию.

Под моделью понимается сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира [ГОСТ Р 57188–2016, статья 2.1.1].

Объектом моделирования могут быть как простые, так и сложные явления, объекты или их свойства. Моделирование может быть статическим или динамическим, детерминированным или стохастическим, а также дискретным или непрерывным, в зависимости от характеристик объекта и целей исследования.

Объектом моделирования выступает явление, объект или свойство объекта реального мира [ГОСТ Р 57412–2017, статья 3.1.2]. Объект моделирования может быть как простым (например, изделие без учета воздействия среды), так и сложным (например, взаимодействие изделия с изделием, изделия со средой и т. п.).

Моделирование – изучение свойств и/или поведения объекта моделирования, выполненное с использованием его моделей [ГОСТ Р 57412–2017, статья 3.1.6]. Для сложных наукоемких изделий моделирование, как правило, является единственной возможностью изучения и оценки свойств изделия без его изготовления. Для подобных изделий сравнение результатов их исследования при помощи создания разных математических моделей может значительно повысить достоверность результатов моделирования.

Основные цели моделирования включают описание объекта, объяснение его свойств и поведения, а также прогнозирование его поведения и свойств. Модели помогают лучше понять и управлять объектами исследования, определяя оптимальные управляющие воздействия и предсказывая последствия этих воздействий.

Научное сообщество предлагает множество классификаций моделей в зависимости от их целей применения, объектов моделирования и форм представления. Примерами видов моделей и методов моделирования являются статическое и динамическое, детерминированное и стохастическое, а также дискретное и непрерывное моделирование.

Вот более подробное объяснение о трех основных методах моделирования:

### **1. Статическое и динамическое моделирование:**

- Статическое моделирование представляет собой изучение объекта или системы в определенный момент времени без учета временных изменений. Такие модели описывают структуру и взаимосвязи элементов системы, но не учитывают динамику изменений во времени. Например, статическая модель может быть использована для описания структуры графа социальных связей без учета динамики этих связей.
- Динамическое моделирование, напротив, учитывает изменения объекта или системы во времени. Такие модели описывают эволюцию системы с течением времени и обычно включают уравнения или алгоритмы, описывающие динамику системы. Например, динамическая модель может использоваться для прогнозирования изменения численности популяции с течением времени.

### **2. Детерминированное и стохастическое моделирование:**

- Детерминированное моделирование предполагает, что поведение системы полностью определяется ее текущим состоянием и внешними воздействиями и что результаты эксперимента воспроизводимы. Это значит, что при одних и тех же входных данных модель всегда будет выдавать один и тот же результат.
- Стохастическое моделирование учитывает случайные факторы или неопределенности в системе. Такие модели включают стохастические переменные или случайные процессы, которые делают результаты моделирования вероятностными. Стохастическое моделирование может быть полезно при изучении систем с переменными условиями или случайными воздействиями, такими как финансовые рынки или биологические популяции.

### **3. Дискретное и непрерывное моделирование:**

- Дискретное моделирование предполагает, что время и пространство разбиты на дискретные интервалы. Такие модели описывают изменения системы в дискретные моменты времени или в дискретных пространственных ячейках. Например, дискретное моделирование может использоваться для описания работы компьютерных сетей, где данные передаются пакетами.
- Непрерывное моделирование предполагает, что изменения системы происходят непрерывно во времени или пространстве. Такие модели используют дифференциальные уравнения или другие математические методы для описания непрерывных процессов. Например, непрерывное моделирование может быть применено для описания движения тела под действием силы гравитации.

На рисунке 5 представлены основные классификации моделей, которые подробно представлены в ГОСТ Р 57412–2017.

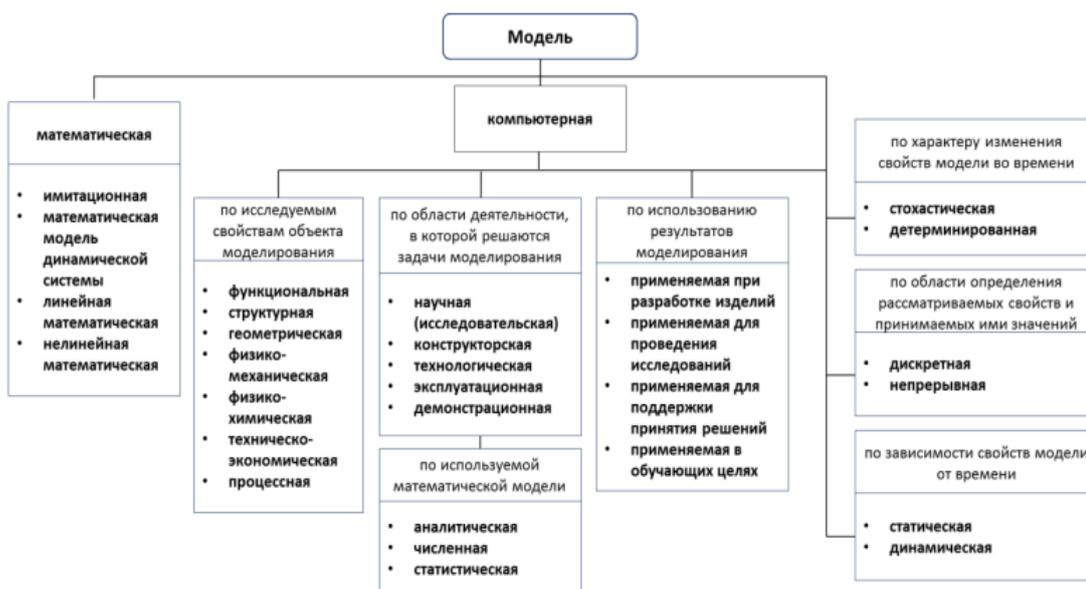


Рисунок 5 – Основные классификации моделей

Этот раздел сфокусирован на разработке математических и компьютерных моделей, которые играют ключевую роль в технологиях цифрового проектирования и моделирования, как было подчеркнуто в предыдущем разделе.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ВИДЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

В рамках национального стандарта ГОСТ Р 57188–2016 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения» рассматривается концепция математической модели и ее ключевые особенности. Математическая модель определяется как модель, в которой информация об объекте моделирования представлена в форме математических символов и выражений. Таким образом, она является аналогом объекта моделирования, описывая его количественные характеристики с использованием математических соотношений.

В рамках стандарта приводятся основные виды математических моделей, среди которых можно выделить имитационную модель, математическую модель динамической системы, линейную и нелинейную математические модели. Имитационная модель представляет собой специфический вид математической модели, который описывает процессы и явления с определенной степенью точности, обычно без учета реальных физических законов и процессов. Математическая модель динамической системы включает систему уравнений, определяющих изменение состояния системы со временем. Линейная математическая модель характеризуется тем, что независимые переменные в нее

входят в виде линейных комбинаций слагаемых, в то время как нелинейная математическая модель не удовлетворяет этому условию.

Отмечается различие между математической и имитационной моделью: во время имитации не учитываются физические законы и процессы, в то время как при построении сложных объектов требуется учет всех влияющих внешних и внутренних факторов.

Стандарт также определяет математическое моделирование как исследование явлений, процессов или систем объектов путем построения, применения и изучения их математических моделей. Подчеркивается, что разные процессы и поведение объектов могут иметь одинаковое математическое описание, но при моделировании необходимо учитывать особенности каждого конкретного объекта и задачи.

Математическое моделирование представляет собой важный инструмент в научных исследованиях, позволяя изучать объекты и явления, которые трудно или невозможно изучать натурными экспериментами. Оно является альтернативой методам натуральных испытаний и универсальной методологией научных исследований.

## **ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Развитие математического и компьютерного моделирования привело к существенным изменениям в методологии подходов к моделированию, включая перенос некоторых этапов моделирования в цифровую среду. Использование моделей, особенно математических, стало необходимым для решения сложных инженерных задач, прогнозирования и оптимизации поведения объектов. С развитием специализированного математического и программного обеспечения моделирование стало значимым инструментом в инженерных расчетах.

До внедрения компьютеров и современных вычислительных методов ученые обычно прибегали к аналитическим методам для решения уравнений. Однако аналитические методы оказались недостаточными для решения более сложных задач, ставших актуальными для современных инженеров. В настоящее время многие математические задачи можно решить только с помощью численных методов.

Один из наиболее широко используемых методов для решения задач с использованием компьютерного моделирования – это метод конечных элементов (МКЭ). В соответствии с ГОСТ Р 57188–2016 это сеточный метод численного решения задач математической физики, основанный на дискретизации исходных краевых задач с использованием специальных конечномерных подпространств функций. Этот метод доказал свою эффективность в решении сложных производственных задач.

Для решения математических задач численными методами применяются алгоритмы, реализованные на компьютере с использованием

специализированного программного обеспечения. Внутри такого программного обеспечения содержится решатель, отвечающий за решение уравнений на основе реализованных в нем численных методов.

Таким образом, при математическом моделировании на компьютере исследователь взаимодействует не с математической моделью объекта моделирования напрямую, а с вычислительной моделью в компьютерной среде. Процесс создания такой модели включает несколько последовательных этапов.

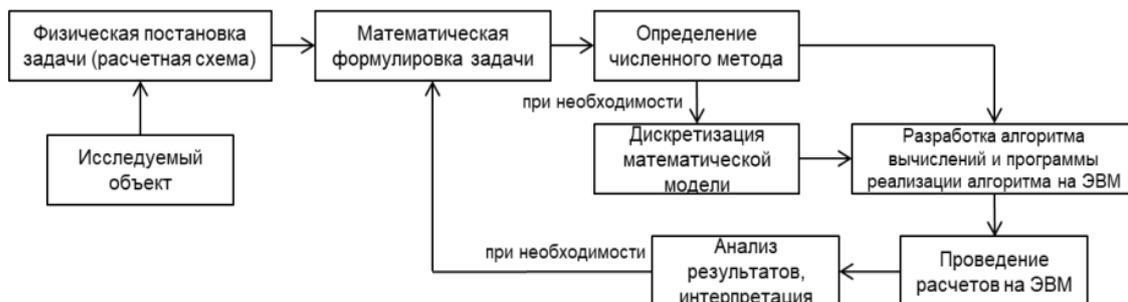


Рисунок 6 – Этапы создания математической модели на ЭВМ  
(Источник: Центр НТИ СПбПУ)

Технологический цикл математического моделирования на компьютере включает несколько этапов, каждый из которых требует участия исследователя. На первом этапе осуществляется физическая формулировка задачи, что означает создание расчетной схемы. Затем на втором этапе проводится математическая формулировка задачи, включающая построение математической модели и, при необходимости, ее дискретизацию. На третьем этапе разрабатывается вычислительный алгоритм для решения задачи, который затем реализуется в виде программы для компьютера. Четвертый этап включает проведение расчетов на компьютере, а пятый – обработку, анализ, визуализацию и интерпретацию результатов, их сравнение с физическим экспериментом и, при необходимости, корректировку математической модели. Этот цикл может повторяться неоднократно. Важно отметить, что на каждом этапе исследователь активно участвует, начиная с постановки задачи и заканчивая интерпретацией результатов. Физическая постановка задачи включает создание упрощенной схемы объекта, которая отражает только существенные особенности и влияющие на него нагрузки для решаемой задачи.

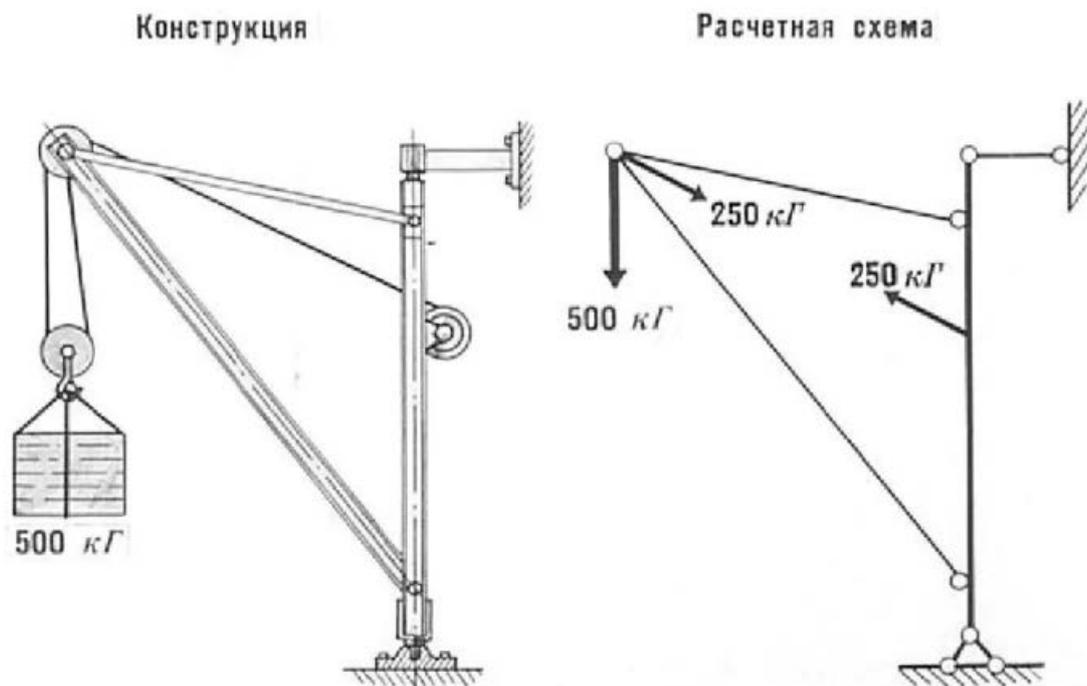


Рисунок 7 – Расчетная схема (Источник: Центр НТИ СПбПУ)

При **математической постановке задачи** создается математическая модель объекта. Важно отметить, что современные вычислительные устройства оперируют только с числами, имеющими конечное количество значащих цифр, т. е. в форме дискретных моделей или конечной последовательности арифметических операций.

Многие задачи в области механики и физики описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, которые описывают непрерывные системы. Для моделирования таких систем математические модели заменяются приближенными дискретными моделями. Это означает переход от дифференциальных или интегральных уравнений к их конечномерным аналогам – дискретным моделям. Такой переход влечет за собой изменение свойств модели: дискретная модель в некотором смысле будет отличаться от первоначальной непрерывной системы. Ошибки, возникающие при этом, обычно называются погрешностями дискретизации. Следовательно, моделирование непрерывных систем возможно только после их предварительной дискретизации, именно с этим связан переход от аналитических методов к численным.

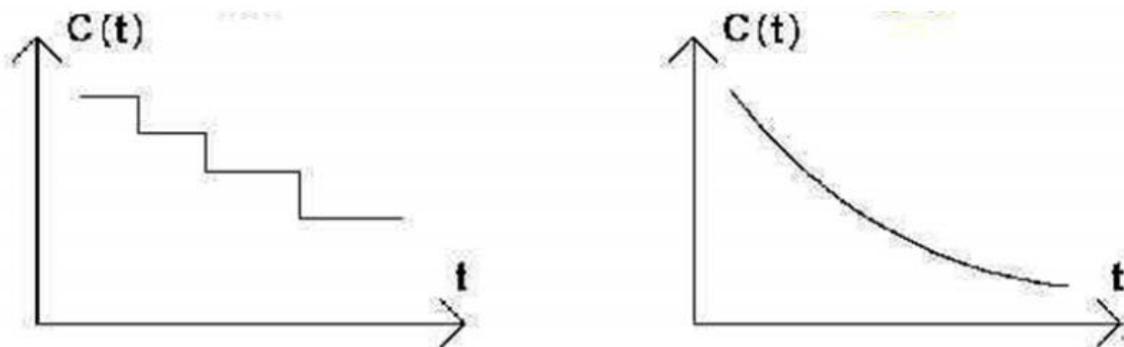


Рисунок 8 – Визуальное представление дискретной (слева) и непрерывной (справа) модели

Когда создается математическая модель, она может быть изначально как непрерывной, так и дискретной. В механике сплошной среды второй случай, когда изначально модель является дискретной, встречается редко, используя лишь в случаях, когда деформации тел незначительны и не требуют дополнительного изучения.

Существует также возможность того, что математическая модель может быть дискретной по одной переменной и континуальной по другой. Например, при изучении динамического поведения системы из абсолютно твердых тел, соединенных упругими пружинами, количество обобщенных координат, описывающих состояние системы в каждый момент времени, конечно, но моментов времени бесконечное множество. В этом случае проводится дискретизация, но уже не по пространству, а по времени.

Другой пример. При исследовании динамического поведения континуальных систем одновременно могут применяться два различных численных метода: один может быть связан с дискретизацией по пространству (например, метод конечных элементов), а другой – с дискретизацией по времени (например, метод центральных разностей). Необходимость дискретизации модели зависит от физической и математической постановки задачи.

После физической и математической формулировки задачи следует поиск или разработка численного метода решения поставленной задачи, который приведет ее к вычислительному алгоритму (в некоторых случаях – после дискретизации модели). Для проведения расчетов на компьютере необходимо разработать последовательность логических и арифметических операций – программу, которая затем транслируется на машинный язык. Эти расчеты предоставляют массивы чисел, описывающих поведение объекта, представляющих решение задачи.

На завершающем этапе анализируются полученные результаты, что позволяет оценить, насколько удачно сформулирована математическая модель и выбран вычислительный алгоритм. Исследование расчетных данных и их сравнение с реальными данными часто показывает, что необходимо учитывать дополнительные физические факторы, что требует создания новой или уточнения предыдущей математической модели.

Таким образом, вычисления на компьютере позволяют проводить изучение, прогнозирование и оптимизацию сложных многопараметрических нелинейных процессов, которые традиционными методами трудно или невозможно исследовать. Однако возникает проблема реализации вычислительного алгоритма в виде программы для компьютера.

Организация модульной структуры алгоритма и вычислительной программы стала ключевым решением, облегчающим разработку и использование компьютерного моделирования. Сборка программы из модулей стала возможной благодаря специальным программам, обеспечивающим автоматизированный процесс.

Эта задача привела к созданию пакетов прикладных программ, таких как системы CAD/CAM/CAE, где компьютерное моделирование является основным инструментом для проведения вычислений. Такие пакеты программ обладают модульной архитектурой и включают в себя множество подпрограмм, реализующих различные алгоритмы.

Использование таких прикладных программных средств позволяет инженерам опускать некоторые этапы алгоритма, так как программные системы способны автоматически выбирать методы, проводить расчеты, визуализировать результаты и т. д. Пользователь просто передает программе постановку задачи и необходимые данные, остальные этапы расчетов выполняются программным обеспечением без его вмешательства.

Такое автоматизированное повышение возможностей программных средств продолжает расширять применение компьютерных вычислений для решения научно-технических задач. Многие численные методы и математические модели разрабатываются заранее инженерами и интегрируются в программные системы разработчиками.

Таким образом, с развитием программных средств алгоритмы математического и компьютерного моделирования стали более автоматизированными. Последовательность действий сохраняется, но множество процедур теперь выполняется программным обеспечением, что делает использование компьютерного моделирования более эффективным и удобным.

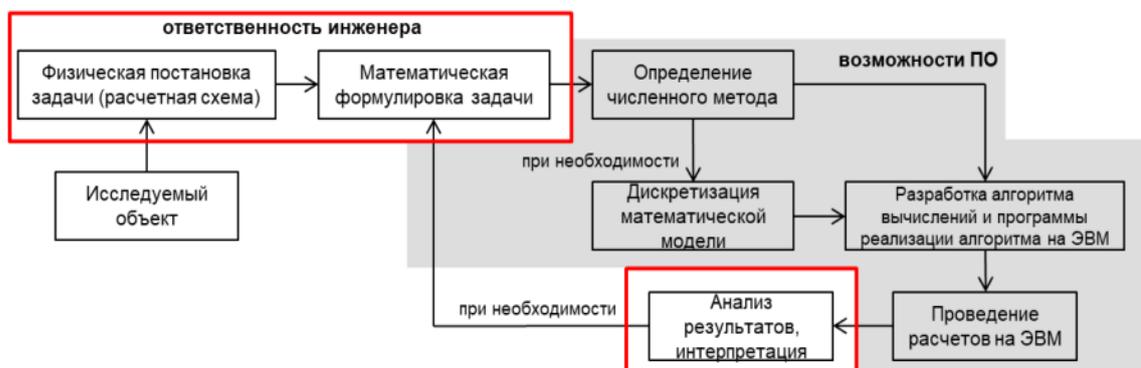


Рисунок 9 – Этапы создания компьютерной модели на ЭВМ

Взаимодействие инженера с программными инструментами ограничивается физической и математической постановкой задачи, анализом и интерпретацией результатов. В ходе моделирования создается не только математическая модель, но и ее компьютерный аналог, который инженер получает по завершении расчетного цикла. Именно на этапе перехода от математической модели к компьютерной модели происходит смена формы представления данных.

Расширение технических возможностей позволяет решать количественно более сложные задачи и изменяет характер научной работы. В результате компьютерное моделирование становится одним из основных инструментов исследований, особенно в случае сложных систем и процессов. С точки зрения более точного и удачного термина следует отметить, что «численное моделирование» более соответствует сути процесса.

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ РОЛЬ В ПРОЦЕССАХ РАЗРАБОТКИ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ**

В связи с продвижением современных информационных технологий, компьютерные модели становятся все более распространенным средством при решении задач в области разработки, производства и эксплуатации изделий. ГОСТ Р 57700.22–2020 «Компьютерные модели и моделирование. Классификация» определяет компьютерную модель как модель, выполненную в компьютерной среде, представляющую собой набор данных и программный код, необходимый для работы с этими данными. Базовой основой компьютерной модели служит математическая модель, реализованная в виде программного кода, а также данные, описывающие конкретный объект моделирования.

В процессе компьютерного моделирования создается расчетная модель, которая является конечно-элементной моделью, содержащей нагрузки, граничные условия и характеристики материалов. **Конечно-элементная модель** представляет собой совокупность элементов простой геометрической формы и конечных размеров, на которые разбивается конструкция для численного моделирования напряженно-деформированного состояния.

Важными элементами компьютерной модели являются начальные и граничные условия, нагрузки и характеристики материалов. **Начальные условия** определяют условия на рассчитываемые величины внутри расчетной области в начальный момент времени моделирования, в то время как **граничные условия** определяют условия на границах расчетной области. **Нагрузки** представляют собой заданные силовые, кинематические и смешанные функции, действующие на модель, а характеристики материалов включают набор значений свойств материала, необходимых для проведения расчетов.

Для применения компьютерной модели в процессе моделирования требуется использование специализированного программного обеспечения. Компьютерные модели изделий применяются на всех стадиях жизненного цикла

изделий, позволяя получать данные, необходимые для принятия решений в различных процессах, таких как разработка, проектирование, производство и эксплуатация.

## **МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ В ИНЖЕНЕРИИ**

1. Введение в мультидисциплинарное моделирование:

- Изделия подвергаются воздействию различных нагрузок и процессов, требуя создания моделей для разных физико-механических явлений.
- Эти модели тесно взаимосвязаны, и их следует рассматривать комплексно, учитывая влияние различных физических процессов друг на друга.

2. Системный подход к проектированию изделий:

- Изделие – это система, включающая разнообразные элементы, что требует мультидисциплинарного подхода к моделированию.
- Математические модели должны охватывать различные области науки и техники, связанные с изделием.

3. Мультидисциплинарность в компьютерном моделировании:

- Мультидисциплинарное моделирование объединяет несколько физических процессов в одну сложную систему.
- Эффективность этого подхода заключается в том, что он позволяет учитывать взаимосвязь различных процессов и явлений при решении сложных задач.

4. Структура мультидисциплинарных моделей:

- Математические и компьютерные модели включают в себя данные и программное обеспечение, описывающие различные физические явления и инженерные дисциплины.
- Для построения высокоточных моделей необходимо учитывать влияние различных физических процессов на функционирование объекта.

5. Преимущества мультидисциплинарного моделирования:

- Мультидисциплинарные модели объединяют все необходимые знания и информацию, необходимую для проектирования, производства и эксплуатации сложных изделий.
- Этот подход обеспечивает корректное описание реального физического мира и способствует развитию науки и технологии.

## ПОНЯТИЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

При разработке компьютерных моделей продуктов или явлений, инженер должен обеспечить их корректность, поскольку искаженная модель не способна верно отразить реальные процессы. Модель должна быть максимально похожей на объект моделирования, хотя и не может быть полностью идентичной ему.

Важным понятием, обеспечивающим правильное поведение разработанного продукта, является адекватность модели по отношению к изучаемому реальному объекту. Это означает соответствие модели основным характеристикам объекта моделирования в пределах допустимых погрешностей.

Адекватность модели была определена стандартом ГОСТ Р 57700.37–2021 как соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик. Факторы, влияющие на уровень адекватности модели, включают квалификацию персонала, доступные технологии, производственные сроки, финансирование и производительность вычислительных систем.

Концепцию адекватности ввели И. И. Блехман, А. Д. Мышкис и Я. Г. Пановко. Под адекватностью понимается правильное качественное и количественное описание объекта по выбранным характеристикам с определенной степенью точности.

Степень адекватности модели может быть оценена от 0 (отсутствие связи между моделью и объектом моделирования) до 1 (высокий уровень соответствия модели реальному объекту). Высокая адекватность достигается, когда поведение модели совпадает с поведением реального объекта.

Важно отметить, что при каждом этапе моделирования могут возникать новые или дополнительные погрешности, что делает итоговую модель (систему моделей) не полностью идентичной исходному объекту. Это требует постоянного контроля и уточнения модели.

Выводы о степени адекватности модели делаются на основе ее способности точно описывать изучаемые характеристики объекта. При этом надо учитывать, что допущения, сделанные при построении модели, могут сделать ее адекватной по некоторым параметрам, но ненадежной по другим. Поэтому важно обеспечить адекватность модели по всем характеристикам, влияющим на решение текущей задачи.

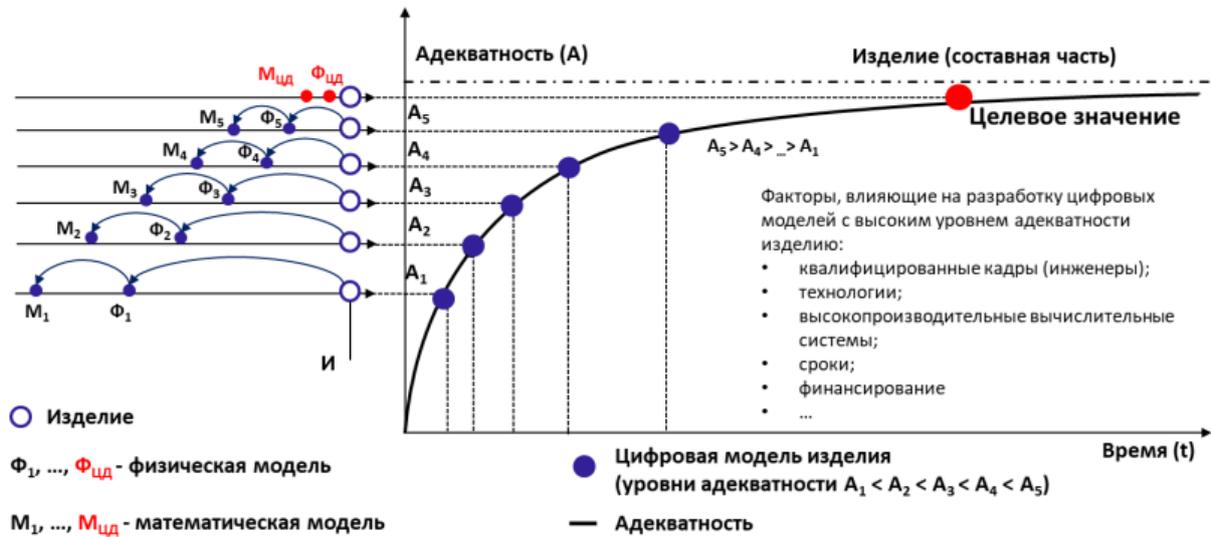


Рисунок 10 – График качественной зависимости адекватности цифровых моделей изделия от различных факторов (Источник: Центр НТИ СПбПУ)

Основными инструментами для проверки уровня адекватности модели являются процессы валидации и верификации. Валидация и верификация позволяют убедиться в том, что модель корректно отображает реальные процессы и соответствует ожидаемым результатам.

Процесс верификации направлен на подтверждение того, что модель правильно реализует заданные технические спецификации и требования. Он включает в себя анализ кода, математических алгоритмов и программного обеспечения модели, чтобы убедиться, что они соответствуют ожидаемому поведению. Верификация также может включать сравнение результатов моделирования с аналитическими решениями или данными из экспериментов.

В то время как верификация удостоверяет, что модель правильно реализована, процесс валидации оценивает, насколько хорошо модель отражает реальные физические процессы или явления. Валидация включает сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными или с данными из независимых источников, чтобы оценить точность модели в различных условиях.

В следующем разделе эти процессы будут подробно рассмотрены с целью предоставить инженерам инструменты для эффективной проверки и обеспечения адекватности моделей.

В предыдущем разделе была выявлена важность оценки адекватности моделей относительно реального изделия. В этом контексте необходимо рассмотреть понятия верификации и валидации моделей, а также верификации и валидации программного обеспечения компьютерного моделирования.

С развитием вычислительной техники и сложности проектируемых изделий возникает потребность в создании общих подходов к оценке достоверности результатов моделирования. Создание модели требует

правильного формулирования математических уравнений относительно объекта моделирования.

## **ВВЕДЕНИЕ В ВЕРИФИКАЦИЮ МОДЕЛЕЙ: ПОНЯТИЯ И ЗНАЧИМОСТЬ**

Например, в стандарте ГОСТ Р 57700.10–2018 «Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области» указывается, что достоверность расчета с использованием разработанной расчетной модели может быть обеспечена при соблюдении ряда условий, включая геометрическую и физическую достоверность, верификацию модели и программного обеспечения компьютерного моделирования, а также валидацию модели и программного обеспечения.

Так, например, в указанном выше ГОСТе указано, что достоверность расчета с использованием разработанной расчетной модели (в контексте нашей лекции – компьютерной модели) может быть достигнута при обеспечении:

- геометрической достоверности;
- физической достоверности;
- верификации модели;
- верификации программного обеспечения компьютерного моделирования (ПО КМ);
- валидации модели;
- валидации ПО КМ;
- проведения количественной оценки неопределенностей.

Таким образом, следует различать верификацию модели и программного обеспечения компьютерного моделирования. В данном разделе будет рассмотрена верификация моделей и ее важность в процессе создания моделей.

## **ПРОЦЕСС ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ**

Понятие верификации моделей впервые упоминается в публикации Общества компьютерного моделирования (Society for Computer Simulation, SCS) в 1979 году. Верификация модели означает обоснование того, что компьютерная модель точно представляет концептуальную модель в заданных пределах точности.

Министерство обороны США (U.S. Department of Defense, DoD) в 1994 году определило верификацию как процесс определения того, что реализация модели точно представляет концептуальное описание модели разработчика.

Американский институт авиации и астронавтики (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) в 1998 году предложил усовершенствованное определение верификации, согласно которому верификация – это процесс

определения, насколько точно реализация модели отражает концептуальное описание модели и ее решение.

Стандарт ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer также определяет верификацию как процесс определения, насколько точно вычислительная модель представляет лежащую в основе математическую модель и ее решение.

В рамках курса верификация математической модели подтверждает корректность решения уравнений математической модели. Основной задачей верификации является установление численной точности решения уравнений модели, что позволяет оценить числовую погрешность решения. Таким образом, верификация служит для обоснования того, что уравнения математической модели решены правильно с использованием программных систем.

Верификация модели может осуществляться различными методами, включая прямой, косвенный, консеквентный, экспертный и инверсный методы. Одним из ключевых аспектов верификации является выявление и оценка погрешностей в решении уравнений, описывающих математическую модель.

Процесс верификации модели может осуществляться различными методами, в зависимости от характера и целей исследования.

1. **Прямой метод.** Включает разработку модели того же объекта с использованием другого математического метода. Путем сравнения результатов, полученных с использованием двух различных методов, можно убедиться в корректности решения.

2. **Косвенный метод.** Предполагает сопоставление результатов, полученных с использованием данной модели, с данными, полученными из других источников. Например, если результаты моделирования соответствуют экспериментальным данным или данным из литературы, это может свидетельствовать о корректности модели.

3. **Консеквентный метод.** Основан на аналитических или логических выводах из ранее полученных результатов. Этот метод позволяет проверить логическую последовательность результатов моделирования.

4. **Экспертный метод.** Включает сравнение результатов моделирования с мнением эксперта в соответствующей области. Эксперт может оценить правдоподобность результатов и дать обратную связь относительно их корректности.

5. **Инверсный метод.** Позволяет проверить адекватность модели и объекта моделирования в ретроспективном периоде, т. е. за прошедший период времени. Путем сравнения прогнозов модели с фактическими наблюдениями или событиями можно оценить точность и достоверность модели.

В целом, верификация модели играет ключевую роль в процессе создания и использования компьютерных моделей. Этот процесс обеспечивает доверие к результатам моделирования и подтверждает их соответствие концептуальной модели и целям исследования.

## ПОГРЕШНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Погрешности при моделировании играют ключевую роль в оценке точности и достоверности результатов. Они могут возникать из различных источников и оказывать влияние на конечный результат моделирования. Рассмотрим основные аспекты верификации решения, связанные с погрешностями:

*Верификация входных данных.* Этот этап включает проверку правильности входных файлов, сеток, данных о материале и физических процессах. Некорректные входные данные могут привести к искаженным результатам моделирования.

*Численная оценка погрешности решения.* На данном этапе оценивается численная точность решения уравнений модели. Погрешности могут возникать из-за различных методов численного решения и дискретизации.

*Верификация выходных данных.* Здесь осуществляется проверка корректности выходных файлов и их последующая обработка. Неверные выходные данные могут быть следствием ошибок в модели или неправильной обработки результатов.

Погрешности могут проистекать из различных источников:

Формирование математической модели на основе гипотез. Применение упрощенных гипотез при создании модели может привести к искажению результатов из-за неполного учета реальных физических явлений.

Пространственная дискретизация. Разбиение пространства на конечные элементы или ячейки может вызывать погрешности из-за недостаточной дискретизации или выбора неоптимального размера элементов.

Дискретизация по времени. Выбор шага по времени при численном интегрировании может влиять на точность результатов, особенно в случае быстро изменяющихся процессов.

Дискретизация по уровню нагрузки. Разбиение нагрузки на дискретные значения может приводить к неточным результатам, особенно при аппроксимации сложных нагрузочных условий.

Итерационные методы. Многократное повторение вычислений может привести к накоплению различий между приближенными и точными значениями.

Численное интегрирование. Применение численных методов интегрирования может вносить ошибки из-за приближенного подхода к вычислениям.

Компьютерное округление. Округление чисел в компьютере может привести к потере точности при выполнении операций.

Компьютерное программирование. Ошибки в программном коде могут привести к неправильной работе модели и искажению результатов.

Эти погрешности требуют тщательной верификации и оценки в процессе создания и использования компьютерных моделей.

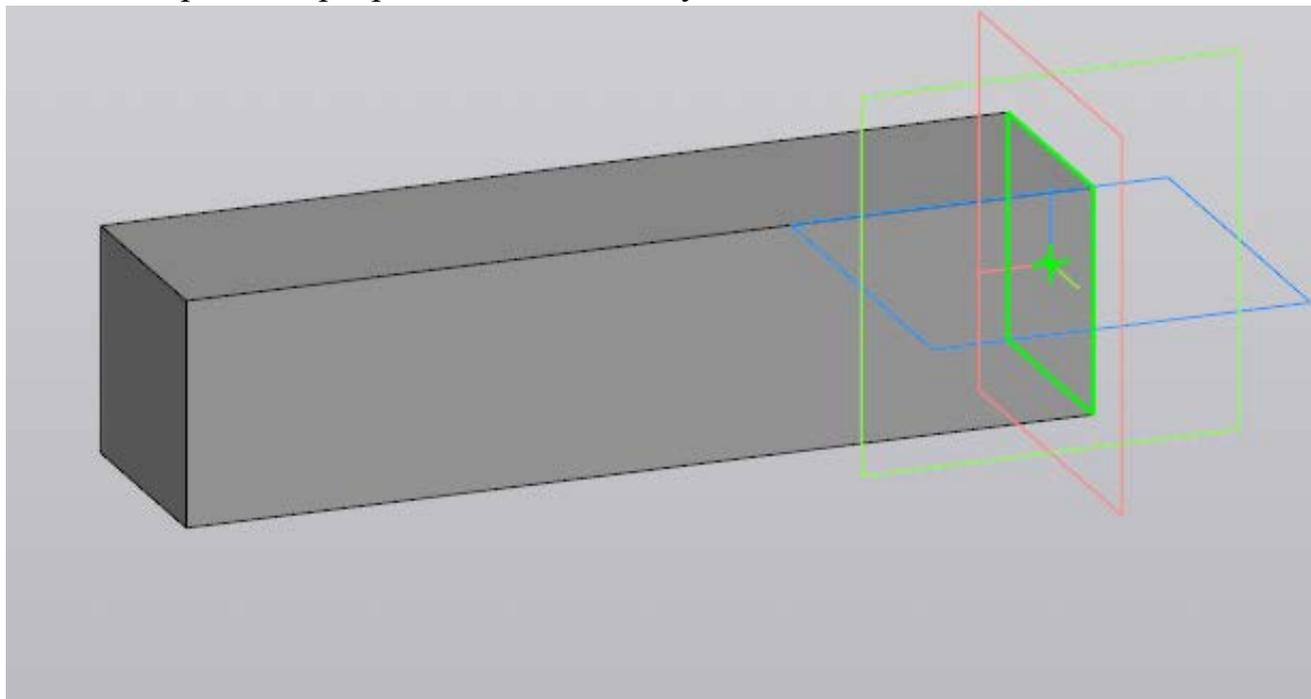
Для более точной оценки и уменьшения погрешностей моделирования важно применять соответствующие методы верификации и валидации. Тщательная проверка входных данных, выбор оптимальных методов численного решения, а также анализ и коррекция возможных источников погрешностей позволят повысить достоверность результатов моделирования.

Кроме того, стандарты и рекомендации, такие как AIAA G-077-1998 и V&V 20-2009, предоставляют основу для систематического подхода к верификации и валидации моделей, что способствует повышению их качества и надежности.

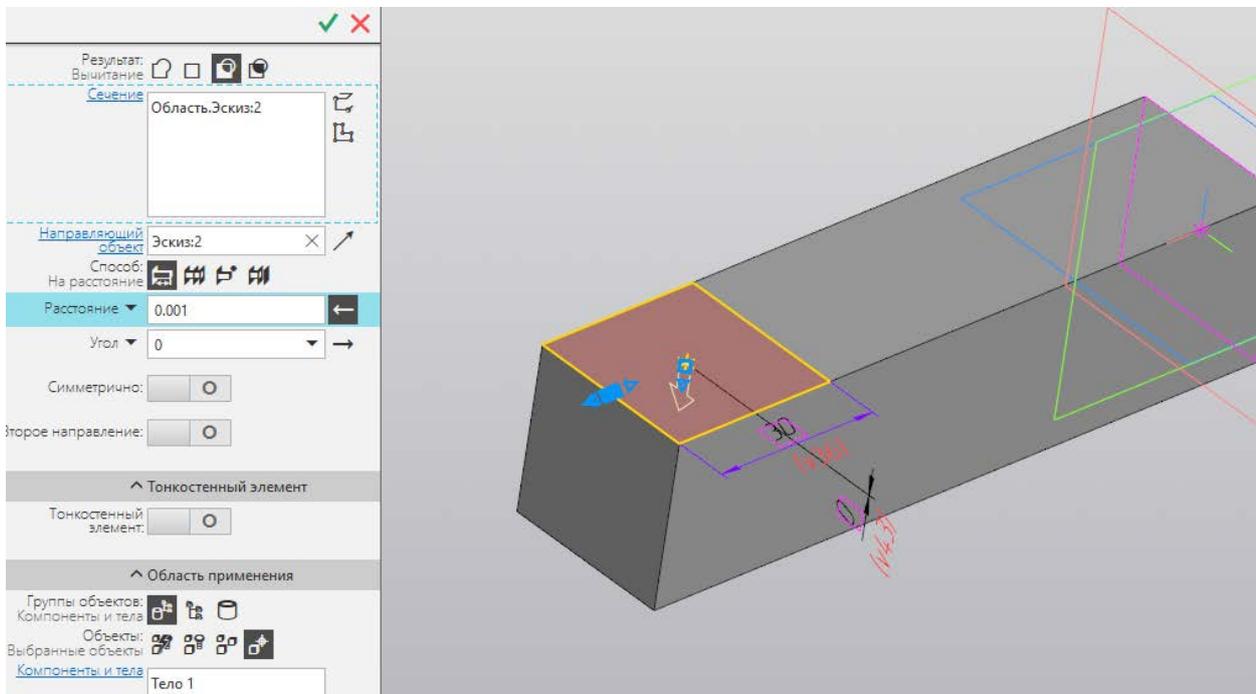
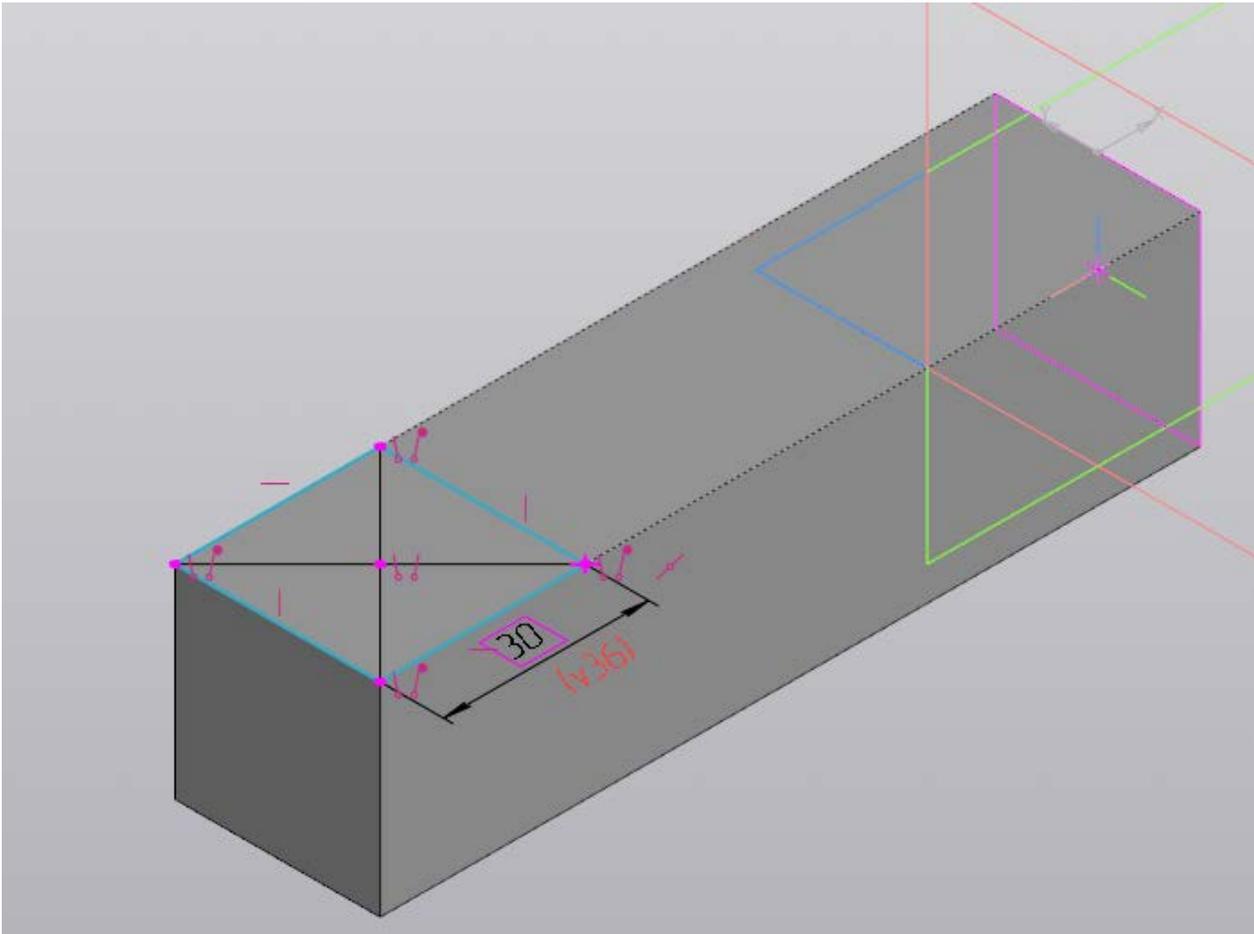
Наконец, важно помнить, что верификация и валидация моделей – это непрерывный процесс, который следует проводить на всех этапах исследования и разработки модели, чтобы обеспечить ее соответствие целям и требованиям приложения.

## **РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ БАЛКИ В САПР КОМПАС-3D**

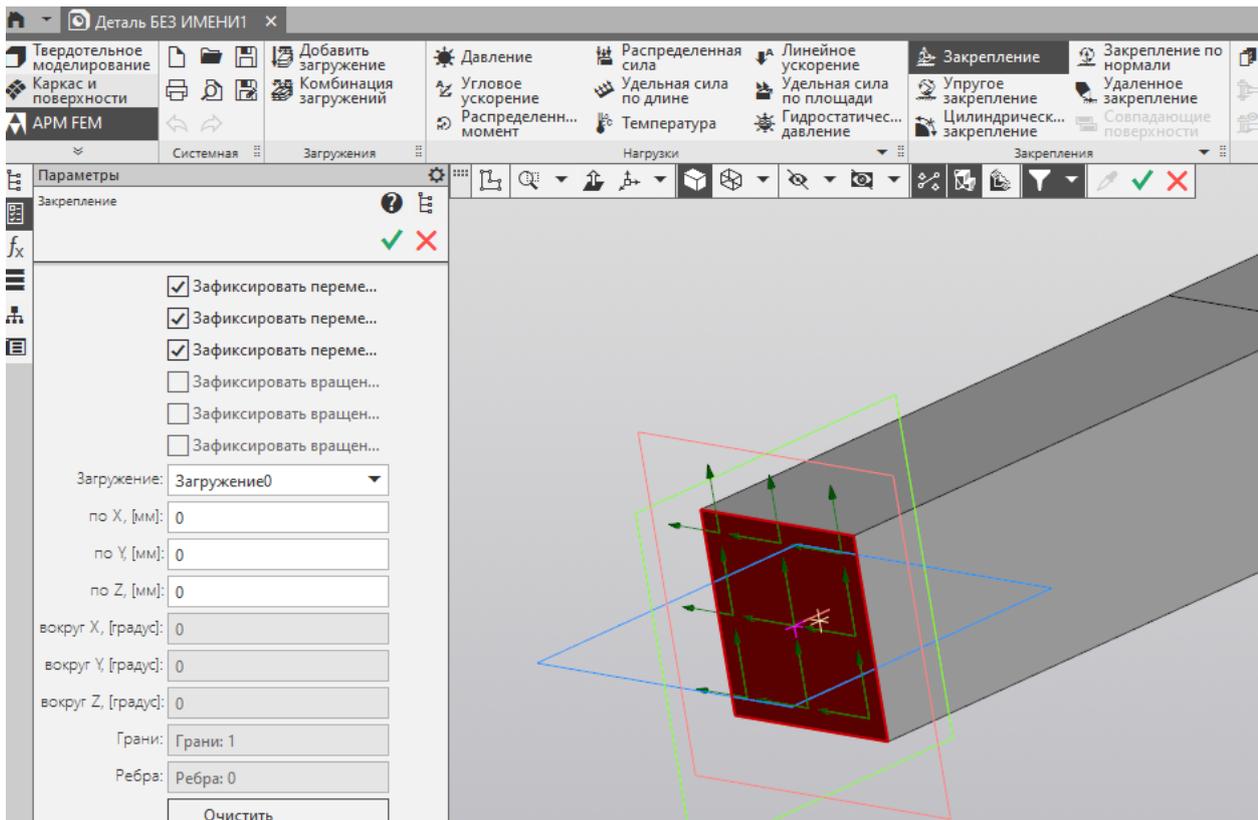
Построим в программе Компас балку сечением 30x30 мм длиной 120 мм



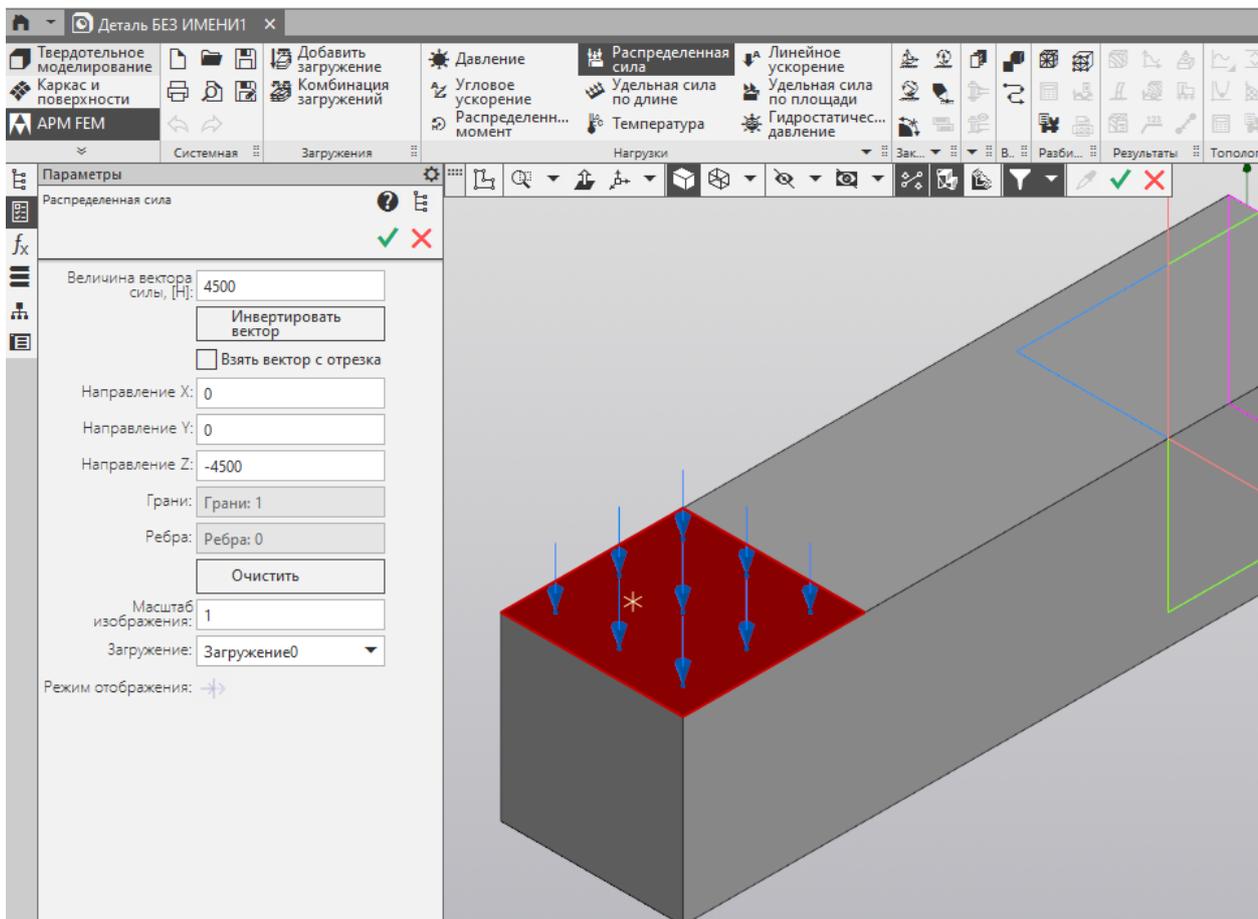
Создадим площадку для приложения силы и вырежем эту площадку на 0,001 мм.



Приложим закрепление к плоскости балки.



На подготовленной площадке зададим нагрузку в -4500 Н (со знаком «минус»).



По умолчанию материал модели – сталь. С указанными ниже параметрами.

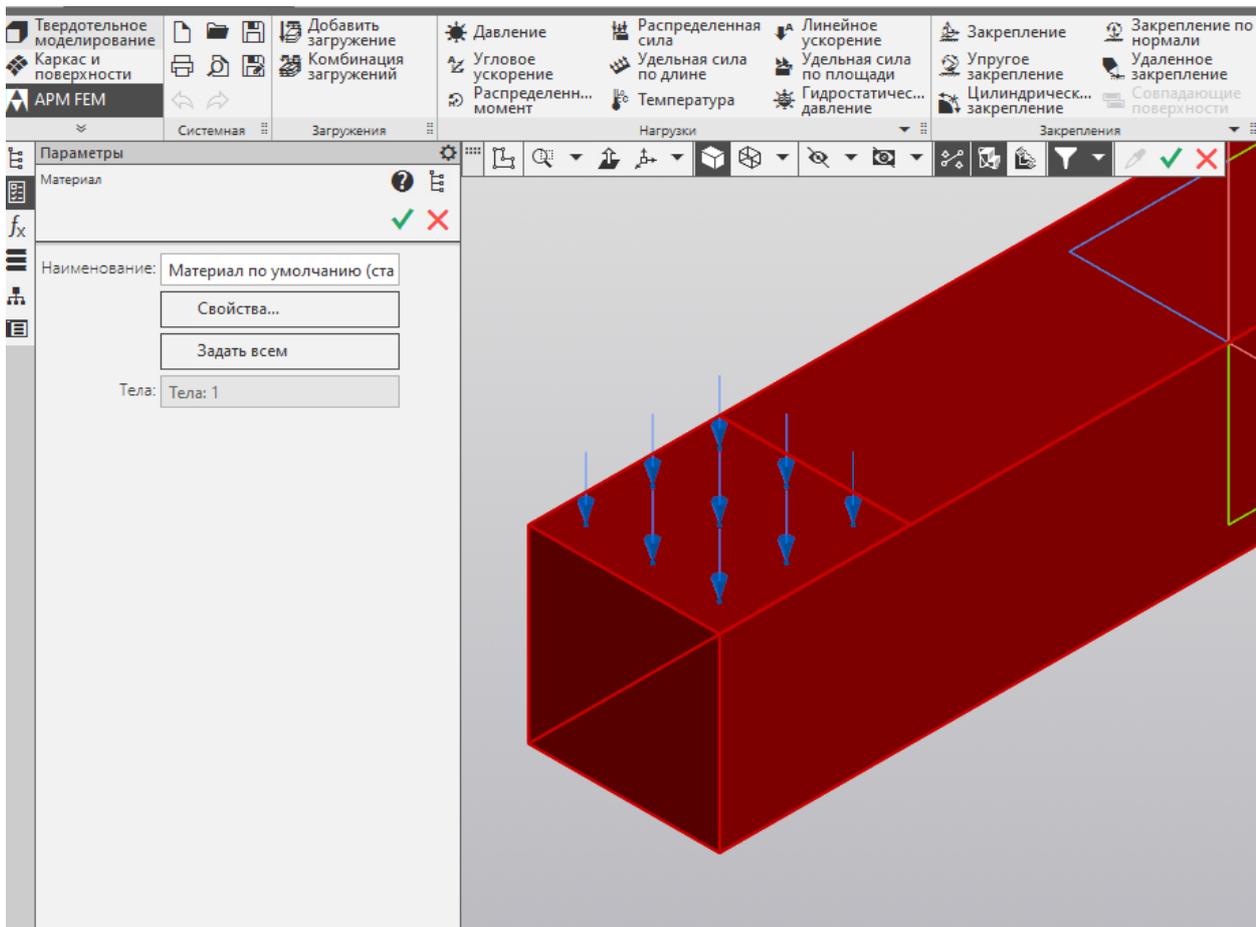
Параметры материала

На основе существующего в модели материала:

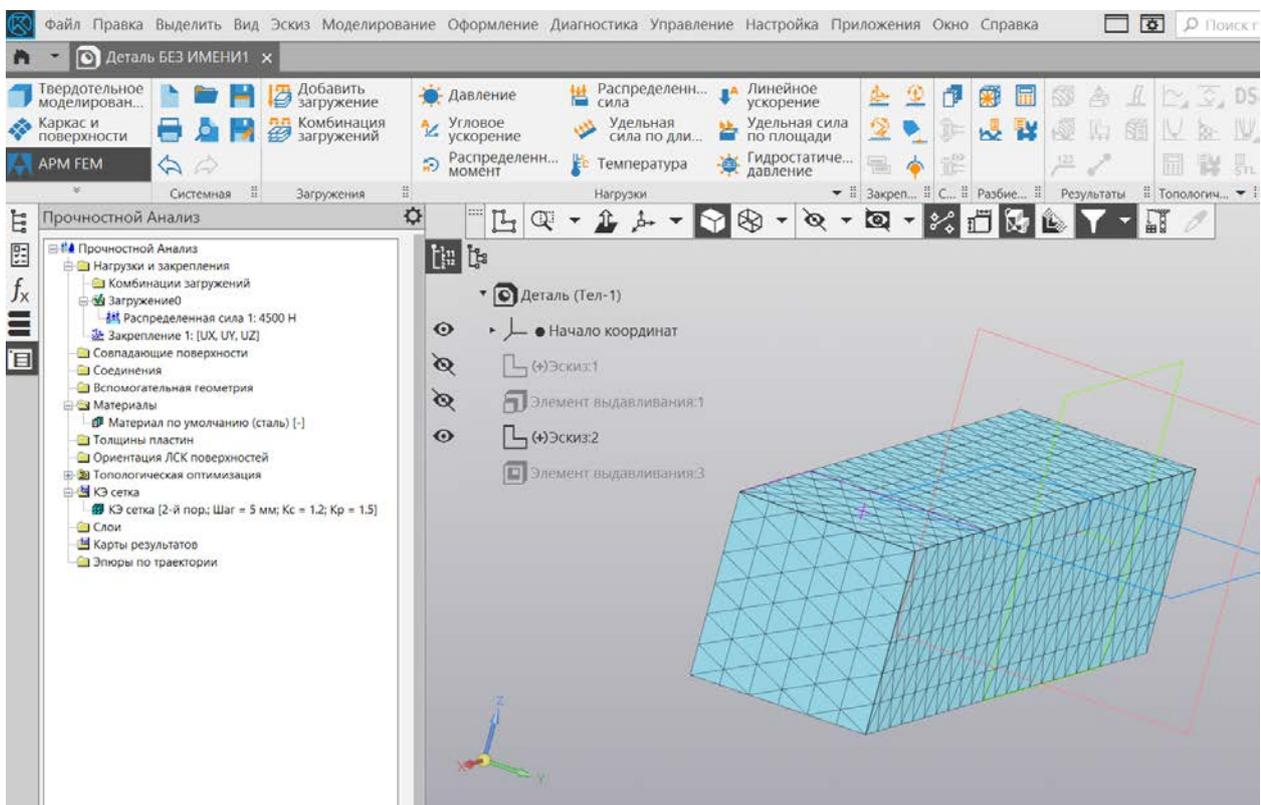
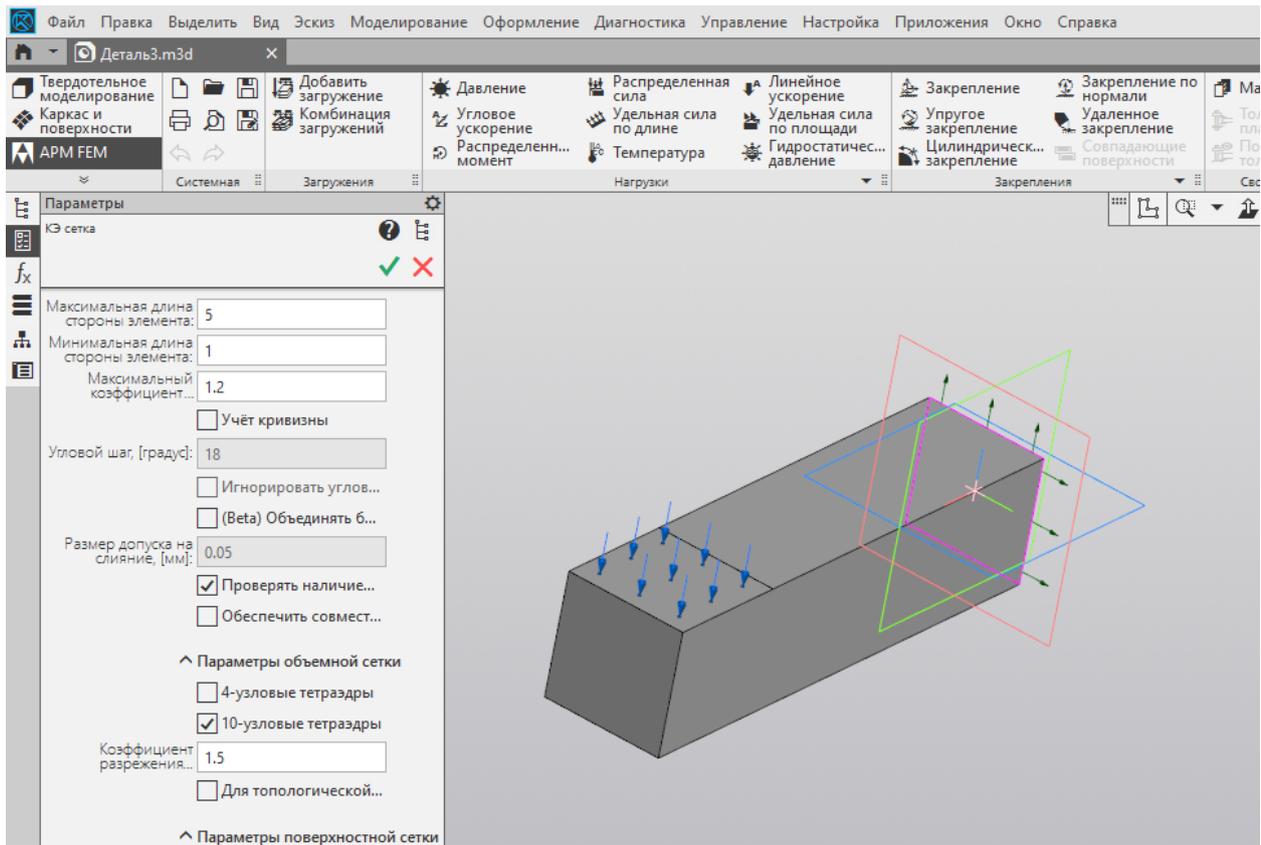
Загрузить

Модуль упругости нормальный, [Н/мм <sup>2</sup> ]	200000
Коэффициент Пуассона, [-]	0.3
Плотность, [кг/мм <sup>3</sup> ]	7.8000011114
Температурный коэффициент линейного расширения, [1/°C]	1.2e-05
Теплопроводность, [Вт/(°C*мм)]	5.5e-05
Предел прочности при сжатии, [Н/мм <sup>2</sup> ]	410
Предел прочности (Временное сопротивление), [Н/мм <sup>2</sup> ]	410
Предел текучести, [Н/мм <sup>2</sup> ]	235
Предел выносливости при растяжении, [Н/мм <sup>2</sup> ]	209
Предел выносливости при кручении, [Н/мм <sup>2</sup> ]	139

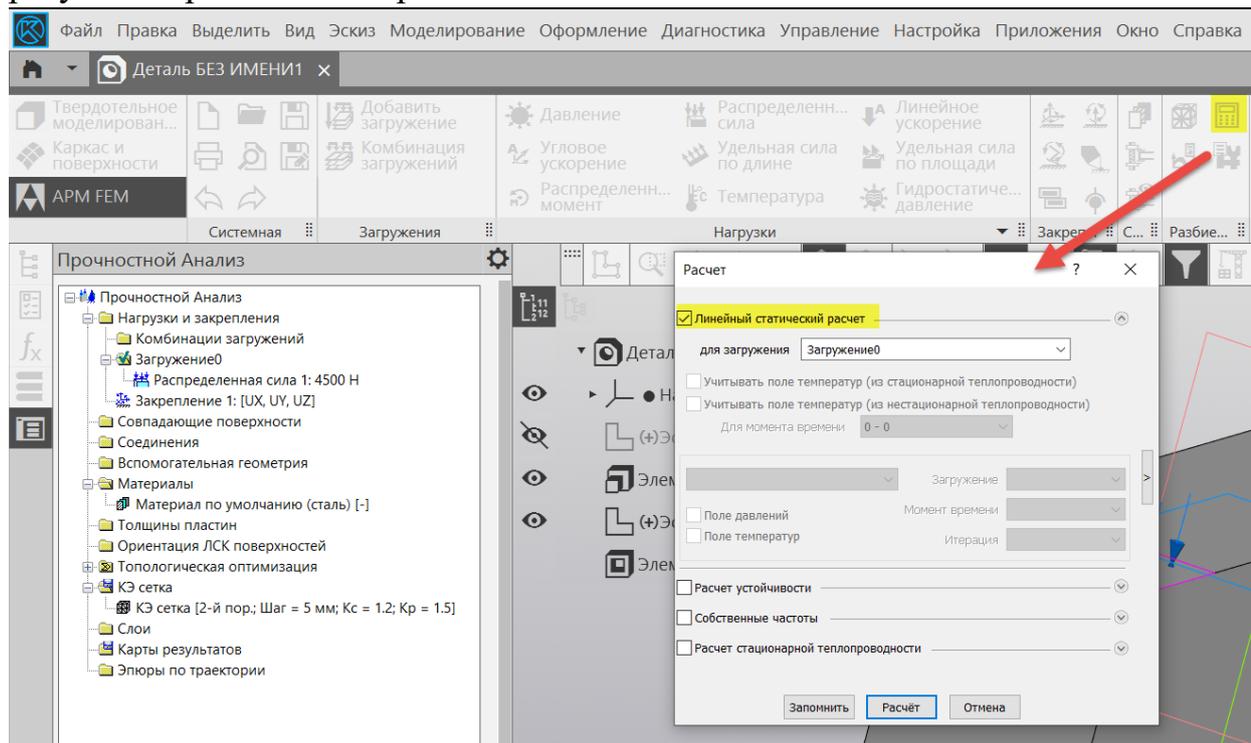
OK Отмена



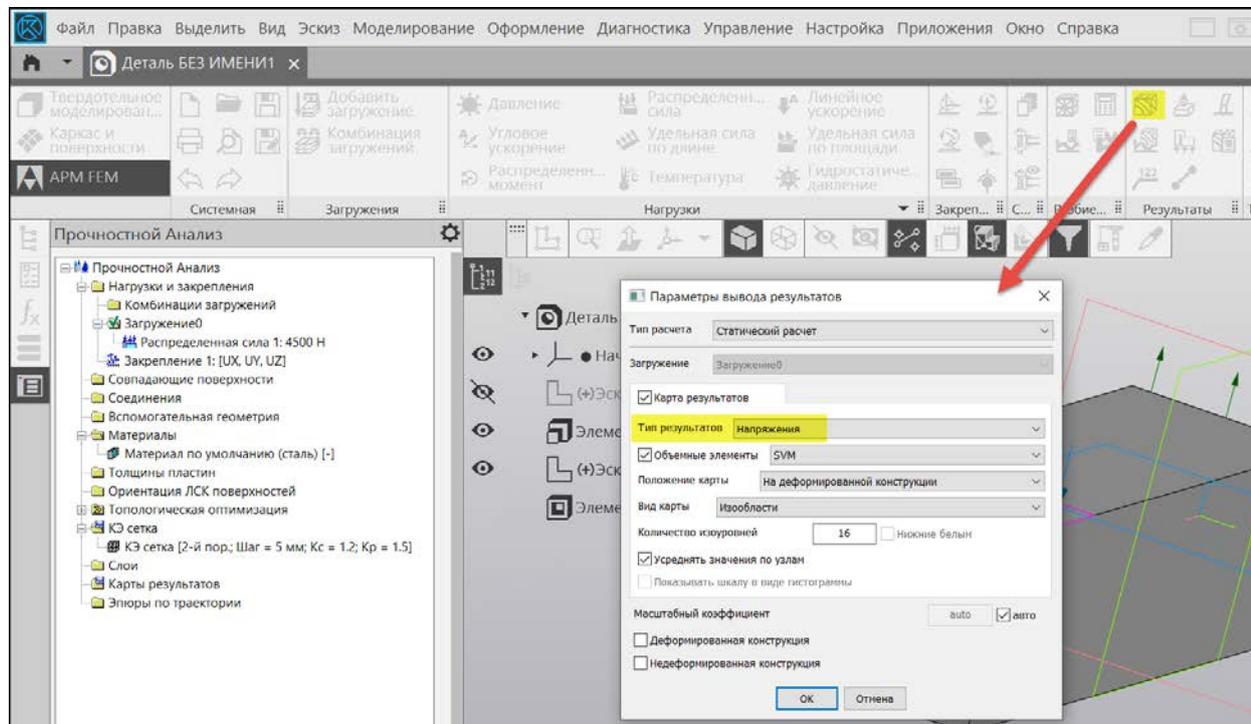
## Проведем разбиение на конечные элементы.



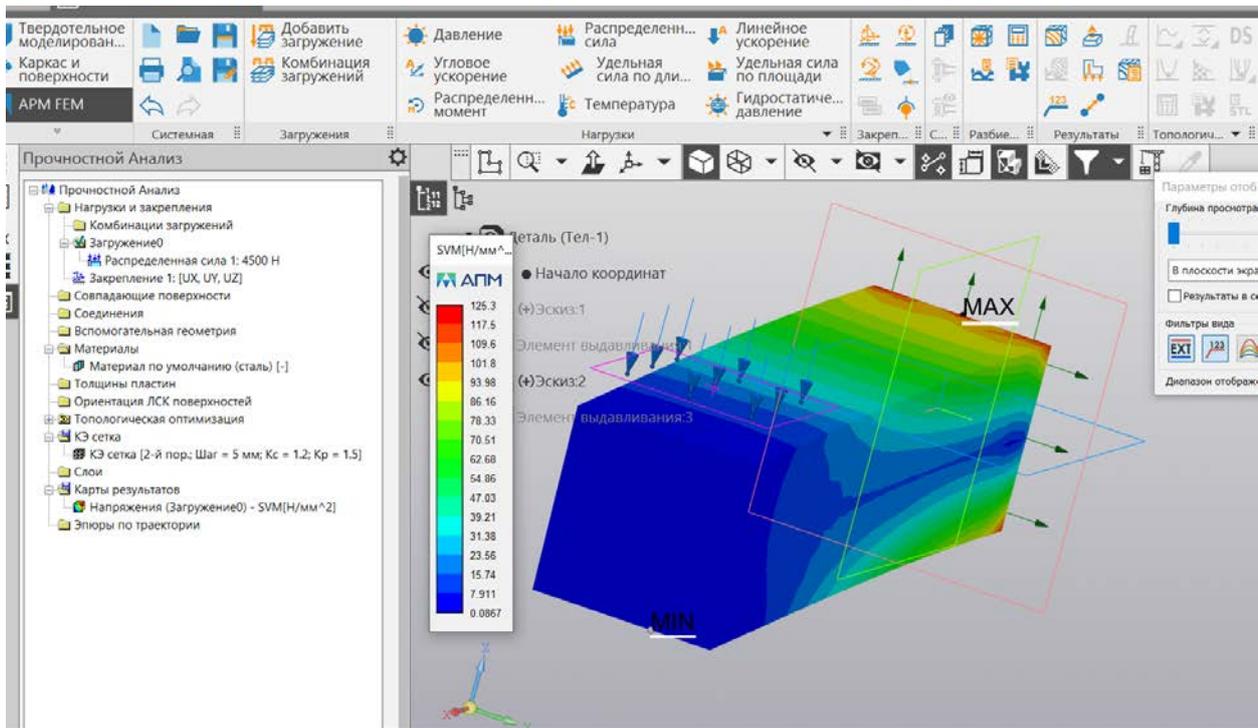
Можно посмотреть элементы внутри конструкции, переместив ползунок результата разбиения вправо.



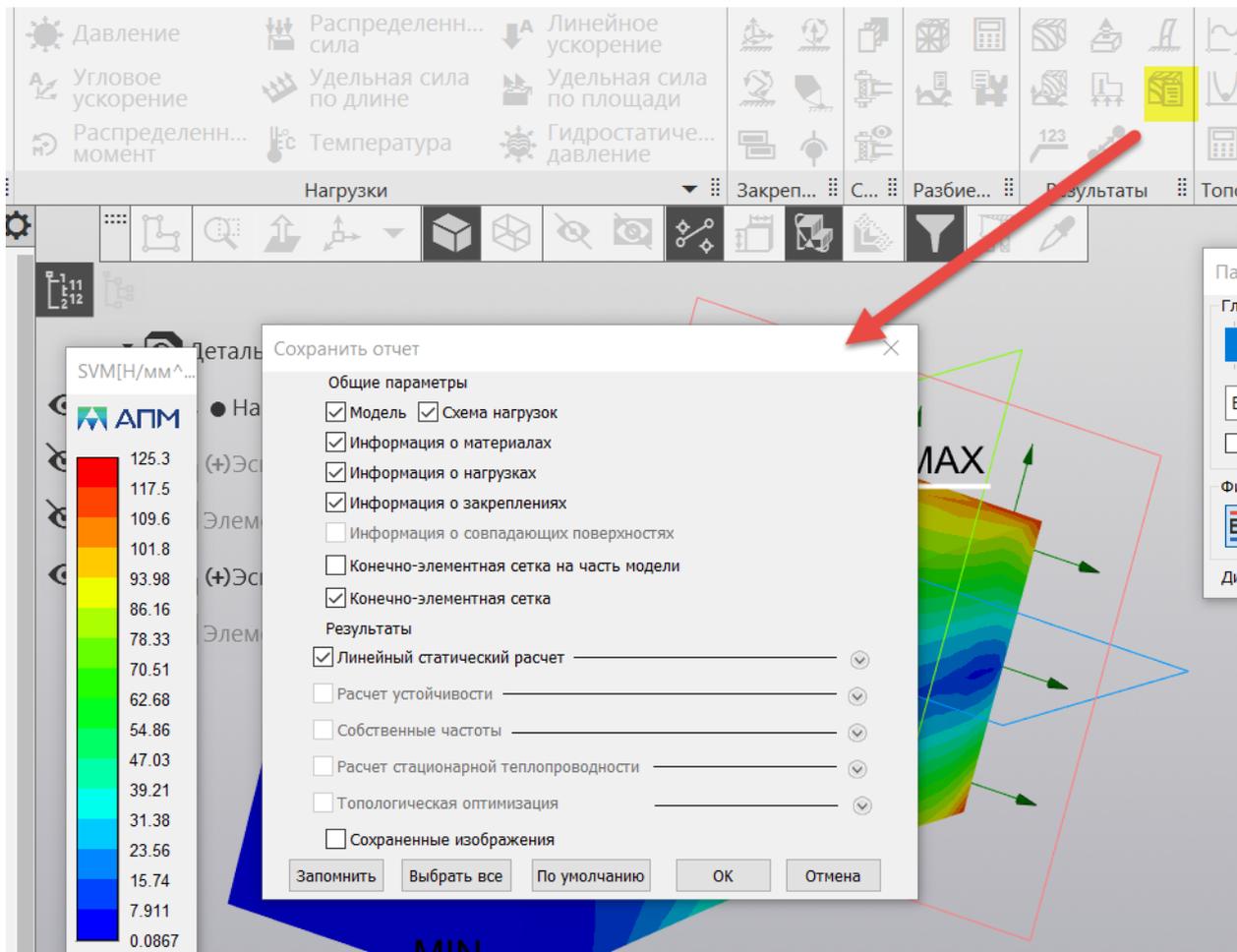
Выбираем статический расчет. После того как расчет выполнен, выбираем карту результатов, выбираем напряжение.



На изображении видим max и min напряжение.



Результаты расчетов сохраним в файле.



Файл сохраняется в формате \*.html, просмотреть его можно в браузере.

## Информация о проекте

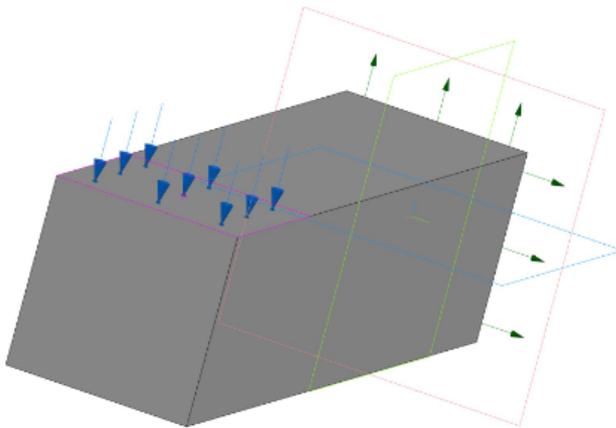
Организация	
Автор	
Дата создания отчета	20.04.2024; 16:15:12
Используемая программа	APM FEM для КОМПАС-3D v21.0.0.14 ( <a href="#">ООО НТЦ "АПМ"</a> )
Путь к файлу	

## Содержание

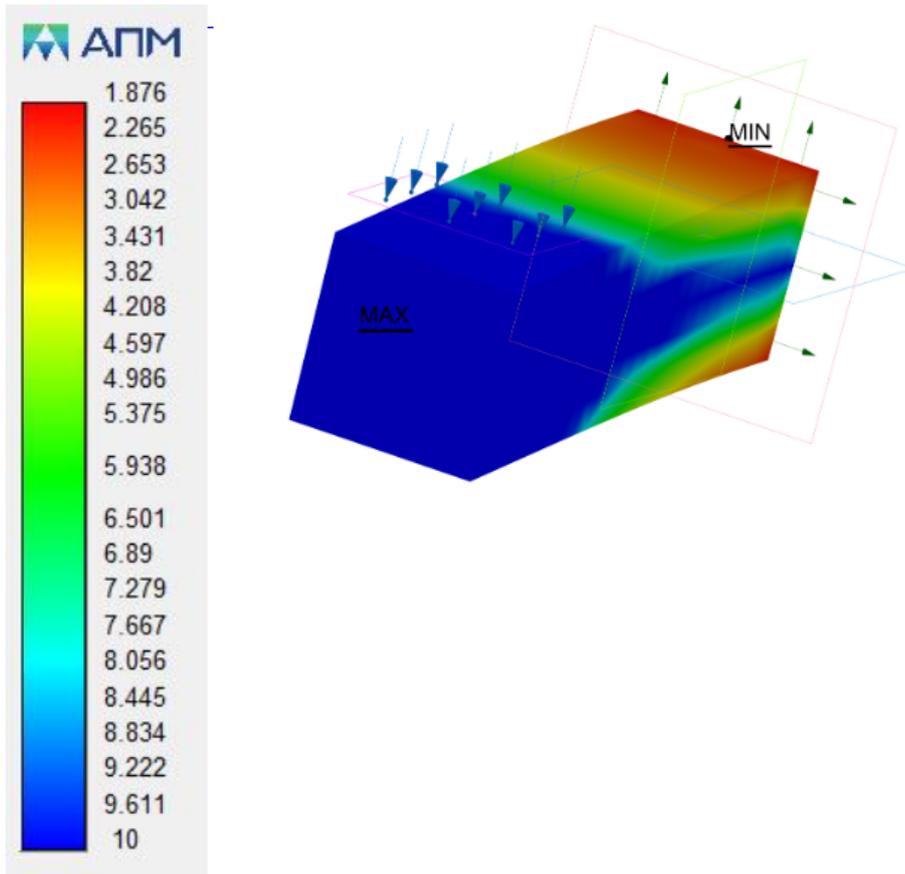
- [1. Введение](#)
- [2. Модель](#)
- [3. Информация о материалах](#)
- [4. Информация о нагрузках](#)
- [5. Информация о закреплениях](#)
- [6. Конечно-элементная сетка](#)
- [7. Результаты](#)
- [8. Заключение](#)

### 1) Введение

### 2) Модель



Наименование	Тип	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент запаса по пределу текучести	SVM	1.875806	10



Коэффициент запаса по текучести – это отношение предела текучести к максимальному напряжению в балке. Значение коэффициента должно быть примерно в пределах 1,3 – 1,7. Коэффициент запаса по пределу текучести равен 1,8, выше заданного предела. Можем сделать вывод, что балка может выдержать данную нагрузку.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / под науч. ред. А.И. Боровкова. – М.: Альянсспринт, 2020. – 401 с. – Режим доступа: <https://dfnc.ru/wp-content/uploads/2020/09/Книга-TSfirovoj-dvojnik.pdf>
2. Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В.А. Штерензон. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 66 с. – Режим доступа: <https://www.rsvpu.ru/filedirectory/3468/shterenzon.pdf>
3. ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=206729>
4. ГОСТ Р 57700.22–2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=239182>
5. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Режим доступа: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=241313>
6. ГОСТ Р 57188–2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=205363>
7. ГОСТ Р 57700.10–2018 «Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=230524>
8. ГОСТ Р 57700.14–2018 Численное моделирование физических процессов. Верификация получаемых сеточными методами численных решений задач механики сплошной среды. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=230527>
9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt): Working Paper. – 2016. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/307509727\\_Origins\\_of\\_the\\_Digital\\_Twin\\_Concept](https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept) (дата обращения: 06.06.2024) Apollo 13 | NASA. Режим доступа: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/apollo/missions/apollo13.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/apollo13.html) (дата обращения: 23.03.2022).
10. Apollo14. Spacecraft changes. – Режим доступа: <https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/apollo14-spacecraft-changes.jpg> (дата обращения: 06.06.2024).
11. The 250 classifications of a Digital Twin. Defining Digital Twin: General News / EDRMedeso Digital Labs. 2021. Режим доступа: <https://digitallabs.edrmedeso.com/blog/defining-digital-twin> (дата обращения: 06.06.2024).

12. AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, AIAA G-077-1998. 1998. Режим доступа: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.504.9699&rep=rep1&type=pdf>
13. Oberkampf W. Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics / W. Oberkampf, T. Trucano, Ch. Hirsch // Applied Mechanics Reviews. 2004. № 57 (5). Pp. 345–384. Режим доступа: <http://sokocalo.engr.ucdavis.edu/~jeremic/UsefulReadings/Oberkampf-Trucano-Hirsch.pdf>
14. Oberkampf W.L., Roy C.J. Verification and validation in scientific computing. Cambridge University Press, 2010. 784 p.
15. Schlesinger S. Terminology for model credibility / Schlesinger S., Crosbie R.E., Gagn R.E., Innes G.S., Lalwani C., Loch J. et al. // Simulation. 1979. No 32. – Pp. 103–104.
16. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer V&V 20-2009(R2021).
17. Thacker B. Concepts of model verification and validation: technical report / Ben H. Thacker, Scott W. Doebling, Francois M. Hemez, Mark C. Anderson, Jason E. Pepin, Edward A. Rodriguez; Los Alamos National Lab. 2004. 27 p. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/236441120\\_Concepts\\_of\\_Model\\_Verification\\_and\\_Validation](https://www.researchgate.net/publication/236441120_Concepts_of_Model_Verification_and_Validation)
18. What is Verification and Validation? ASME Guide, NAFEMS. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/365507242/What-is-Verification-and-Validation-NAFEMS>
19. Verification and validation in industrial simulation / E.J. Williams // Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, July 1998, Reno, NV. 1998. Pp. 57–62. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/258763368\\_Verification\\_and\\_Validation\\_in\\_Industrial\\_Simulation](https://www.researchgate.net/publication/258763368_Verification_and_Validation_in_Industrial_Simulation)

Учебное издание

**Томилова Ольга Васильевна  
Кауров Павел Владимирович**

**Автоматизированное проектирование  
технологических машин и оборудования**

*Учебное пособие*

Редактор и корректор М. Д. Баранова  
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:  
электронное устройство с программным обеспечением для воспроизведения  
файлов формата PDF

Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю. –  
Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 10.06.2024 г. Рег. № 5202/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.