

# Архитектура кросс-рыночного, кросс-отраслевого направления «Технет» НТИ





**Технет**  
Национальная  
технологическая  
инициатива



**НЦМУ**  
ПЕРЕДОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ



**ЦИФРОВОЙ  
ИНЖИНИРИНГ**  
ПИШ СПбПУ



**ПОЛИТЕХ**  
Центр Национальной  
технологической инициативы  
Новые производственные технологии

**CML**  
CompMechLab

ЦЕНТР  
КОМПЬЮТЕРНОГО  
ИНЖИНИРИНГА СПбПУ

АРХИТЕКТУРА КРОСС-РЫНОЧНОГО,  
КРОСС-ОТРАСЛЕВОГО НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ  
(ВКЛЮЧАЯ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ  
КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ)

Экспертно-аналитический доклад

Санкт-Петербург

2024

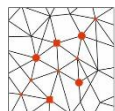
Авторы:

А. И. Боровков, Е. Р. Мартынец, Л. А. Щербина, Л. А. Нездоймышапко, Ю. А. Рябов,  
К. В. Кукушкин, Е. Р. Хуторцова, Е. И. Павлова, Е. П. Чхеидзе

**Архитектура кросс-рыночного, кросс-отраслевого направления «Технет» НТИ (включая обзор применения технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений в машиностроении). Экспертно-аналитический доклад**

Экспертно-аналитический доклад направлен на формирование концептуальной архитектуры направления «Технет» НТИ в разрезе технологических сегментов, объединяемых комплексом передовых производственных технологий. В докладе представлены цепочки коопераций, отраслевые применения технологий и продуктов, оценка зависимости от импорта технологий, а также бенчмарки показателей развития технологических сегментов направления «Технет» НТИ. Представленные результаты анализа позволяют оценить текущее состояние и вектор дальнейшего развития технологий направления «Технет» НТИ, тенденции, достижения и перспективы развития данного направления.

Подготовлен Инфраструктурным центром по развитию направления Национальной технологической инициативы «Технет» (передовые производственные технологии) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.



**Technet**  
National  
Technology  
Initiative | Advanced  
Manufacturing  
Technologies



**WCRC**  
ADVANCED DIGITAL  
TECHNOLOGIES



**DIGITAL  
ENGINEERING**



**POLYTECH**  
Advanced Manufacturing  
Technologies Center  
National Technology Initiative

**CML**  
CompMechLab

SPbPU COMPUTER-AIDED  
ENGINEERING CENTRE  
OF EXCELLENCE

# NTI's TECHNET: A CROSS-MARKET AND CROSS-INDUSTRY FOCUS AREA FRAMEWORK AND DIGITAL DESIGN AND SIMULATION FOR CONFIGURATION VALIDATION IN MECHANICAL ENGINEERING APPLICATIONS

An expert and research report

St. Petersburg

2024



Authored by:

A. I. Borovkov, E. R. Martynets, L. A. Shcherbina, L. A. Nezdoimyshepko, Yu. A. Ryabov,  
K. V. Kukushkin, E. R. Khutortsova, E. I. Pavlova, E. P. Chkheidze

**NTI's Technet: A Cross-Market and Cross-Industry Focus Area Framework and Digital Design and Simulation for Configuration Validation in Mechanical Engineering Applications. An Expert and Research Report.**

This expert research report develops a conceptual framework for the NTI Technet focus area, emphasizing technology segments integrated through advanced manufacturing technologies. The analysis includes collaboration chains, industry applications, import dependencies, and benchmarks for performance indicators. These findings inform an assessment of the current state and future outlook of technology development, trends, and progress within the NTI Technet focus area.

This report has been prepared by the National Technology Initiative's Technet Infrastructure Center at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ОГЛАВЛЕНИЕ.....                                                                                                               | 5  |
| СПИСОК РИСУНКОВ .....                                                                                                         | 6  |
| СПИСОК ТАБЛИЦ .....                                                                                                           | 7  |
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                | 8  |
| ЦЕПОЧКИ КООПЕРАЦИЙ В РАМКАХ НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ.....                                                                     | 10 |
| 1.1. Концепция цепочек коопераций.....                                                                                        | 10 |
| 1.2. Архитектура современных промышленных систем и цепочек коопераций.....                                                    | 11 |
| ОТРАСЛЕВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУКТОВ ПО<br>НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ.....                                   | 20 |
| Применение технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования<br>компоновочных решений в машиностроении..... | 29 |
| ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ИНОСТРАННЫХ ПОСТАВЩИКОВ И КОМПЛЕКТУЮЩИХ В РАМКАХ<br>НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ.....                              | 50 |
| БЕНЧМАРКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ НАПРАВЛЕНИЯ<br>«ТЕХНЕТ» НТИ.....                                          | 61 |
| ГЛОССАРИЙ ТЕРМИНОВ НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ .....                                                                             | 65 |
| БИБЛИОГРАФИЯ .....                                                                                                            | 75 |

## СПИСОК РИСУНКОВ

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Рисунок 1. Пирамида автоматизации.....                                                                                    | 11 |
| Рисунок 2. Модель RAMI 4.0 (Германия).....                                                                                | 12 |
| Рисунок 3. Модель IMSA (КНР) .....                                                                                        | 13 |
| Рисунок 4. Типы сотрудничества в рамках кастомизированного производственного процесса.....                                | 15 |
| Рисунок 5. Схема SMCS с учетом трех фокусов .....                                                                         | 16 |
| Рисунок 6. Цепочки кооперации в рамках «фабрик будущего» направления «Технет» НТИ.....                                    | 18 |
| Рисунок 7. Механизм формирования цепочек кооперации в рамках направления «Технет» НТИ.....                                | 19 |
| Рисунок 8. Структура валового внутреннего продукта (ВВП) России по отраслям экономики в 2023 году в текущих ценах, %..... | 31 |
| Рисунок 9. Механизм конструкции скважинного трактора.....                                                                 | 32 |
| Рисунок 10. Конфигурация скважинного трактора Шлюмберже.....                                                              | 32 |
| Рисунок 11. Архитектура CAD-модели мотор-колеса.....                                                                      | 45 |

## СПИСОК ТАБЛИЦ

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Таблица 1. Инструменты, применяемые для моделирования динамики многомассовых систем....                     | 36 |
| Таблица 2. Технологии вычислительной гидродинамики (CFD).....                                               | 39 |
| Таблица 3. Технологии анализа прочности (Strength analysis).....                                            | 42 |
| Таблица 4. Обмен данными в CAD-модели мотор-колеса (на примере мотор-колеса для скважинного трактора) ..... | 46 |
| Таблица 5. Типы бенчмарков показателей для технологических сегментов направления «Технет» .....             | 61 |

## ВВЕДЕНИЕ

Аналитическое исследование архитектуры рынка «Архитектура кросс-рыночного, кросс-отраслевого направления "Технет" НТИ (включая обзор применения технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений в машиностроении)» подготовлено Инфраструктурным центром по развитию направления Национальной технологической инициативы «Технет» (передовые производственные технологии), созданного в 2024 году на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Подготовка аналитического доклада об архитектуре направления «Технет» НТИ стала одной из важнейших задач Инфраструктурного центра «Технет» СПбПУ, реализуемых совместно с Департаментом архитектуры НТИ и аналитики АНО «Платформа НТИ», а также с представителями экспертного сообщества, в 2024 году.

В рамках работы была сформирована концептуальная архитектура направления «Технет» НТИ, выделены сегменты и оформлен классификатор-справочник технологий данного направления, а также подготовлен реестр компаний, относящихся к направлению «Технет» НТИ.

Аналитическое исследование станет основой для формирования аналогичных ежегодных исследований в период деятельности Инфраструктурного центра (2024–2026 гг.), которые будут актуализированы в последующие годы с учетом глобальных тенденций развития сегментов направления «Технет» НТИ и целей технологического лидерства, обозначенных в Указе Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [1].

Результаты данного исследования архитектуры направления «Технет» НТИ будут использованы для совершенствования системы анализа и формирования механизма сбора и мониторинга данных о текущем состоянии развития передовых производственных технологий в России.

В рамках проведенного аналитического исследования сформированы разделы, посвященные рассмотрению цепочки коопераций, отраслевым применениям технологий и продуктов, оценке зависимости от импорта технологий и бенчмаркам показателей развития технологических сегментов направления «Технет» НТИ.

Первая глава описывает цепочку коопераций направления «Технет» НТИ, которая сочетает в себе основные взаимосвязи и взаимодействия между различными участниками цепочки и технологии, обеспечивающие реализацию Цифровых (Digital), «Умных» (Smart) и Виртуальных (Virtual) Фабрик Будущего, составляющих концептуальную основу направления «Технет» НТИ.

В рамках второй главы раскрыты примеры применения технологий, составляющих основу технологических сегментов направления «Технет» НТИ, в различных отраслях промышленности, а также представлен обзор категорий продуктов, разрабатываемых с использованием передовых производственных технологий.

Также представлен более подробный анализ применения технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений в машиностроении на примере оборудования для нефтегазовой отрасли.

Третья глава посвящена оценке зависимости российских компаний от иностранных поставщиков технологических решений в сегментах цифрового проектирования и моделирования, технологий управления жизненным циклом изделий, технологий «умного» производства (с фокусировкой на аддитивных технологиях, робототехнике и др.) и новых материалов (в особенности, композиционных материалов).

В четвертой главе представлены бенчмарки показателей, распределенные на три группы, при формировании которых учитывались функциональные возможности, экономическое значение и уровень распространения технологий рассматриваемых сегментов направления «Технет». Представленные результаты анализа позволяют оценить текущее состояние и вектор дальнейшего развития технологий направления «Технет» НТИ.

Кроме того, в экспертно-аналитическом отчете представлен глоссарий основных терминов и определений, применяемых в области технологических сегментов, составляющих основу направления «Технет» НТИ.

Таким образом, каждая глава аналитического исследования отражает определенные аспекты архитектуры кросс-рыночного, кросс-отраслевого направления «Технет» НТИ и формирует представление об актуальных тенденциях, достижениях и перспективах направления «Технет» НТИ.

## ЦЕПОЧКИ КООПЕРАЦИЙ В РАМКАХ НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ

Одной из задач исследования является формирование подходов к определению цепочек кооперации в рамках направления «Технет» (передовые производственные технологии) НТИ.

### 1.1. Концепция цепочек коопераций

В научной литературе кооперация зачастую рассматривается в контексте цепочек поставок, которые стали активно исследоваться в 1980х годах. Цепочки поставок представляют собой набор подходов, которые используются для эффективной интеграции поставщиков, производителей, складов, точек реализации для того чтобы продукция производилась, распределялась в необходимых количествах, своевременно доставлялась в требуемые места в нужное время. При этом подходы направлены на минимизацию издержек при сохранении качества услуг [2].

Большая часть определений цепочек поставок основана на идее **кооперации различных участников рынка с целью получения выгод** [2].

Кооперация в рамках цепочек поставок определяется как процесс координации целей и действий агентов, при этом в англоязычной литературе помимо слова “cooperation” (кооперация) используется слово “collaboration” (сотрудничество) – сотрудничество в рамках цепочек поставок предполагает совместную работу нескольких участников цепочки, принятие совместных решений и получение совместных выгод от взаимодействия [2].

Также выделяются несколько видов кооперации в рамках цепочек поставок:

- 1) Кооперация внутри организации и между организациями.
- 2) Горизонтальная кооперация (покупатель – покупатель, продавец – продавец) и вертикальная кооперация (покупатель – продавец).

К ключевым различиям горизонтальной и вертикальной кооперации относится фокус: для первого типа – это получение синергетических эффектов (экономия на масштабе, объем, скорость), а для второго типа – это фокусировка на технических аспектах. Именно вертикальная кооперация закладывает основу для развития цепочек поставок в целом [2].

В российской научной литературе цепочки коопераций также рассматриваются в контексте промышленной кооперации, которая представляет собой «добровольное и долгосрочное сотрудничество на взаимовыгодной основе субъектов хозяйствования, позволяющее предприятиям развивать собственные конкурентные преимущества и получить дополнительные финансово-экономические эффекты, в том числе за счет наращивания потенциальных возможностей от участия в промышленной кооперации» [3]. Существующие определения позволяют сопоставить промышленную кооперацию и теорию управления цепочек поставок.

В литературе, посвященной передовым производственным технологиям и умным производствам, тема кооперации рассматривается в нескольких контекстах:

- 1) Изменения кооперации в рамках цепочки поставок под влиянием технологий Индустрии 4.0 [4].

Так, внедрение в управление цепочками поставок информационных коммуникационных технологий способствует развитию сетей кооперации [5].

- 2) Влияние кооперации на внедрение технологий Индустрии 4.0 по цепочке добавленной стоимости промышленных предприятий. Например, кооперация в рамках сетей цепочек поставок способствует быстрому внедрению технологий Индустрии 4.0 [5].

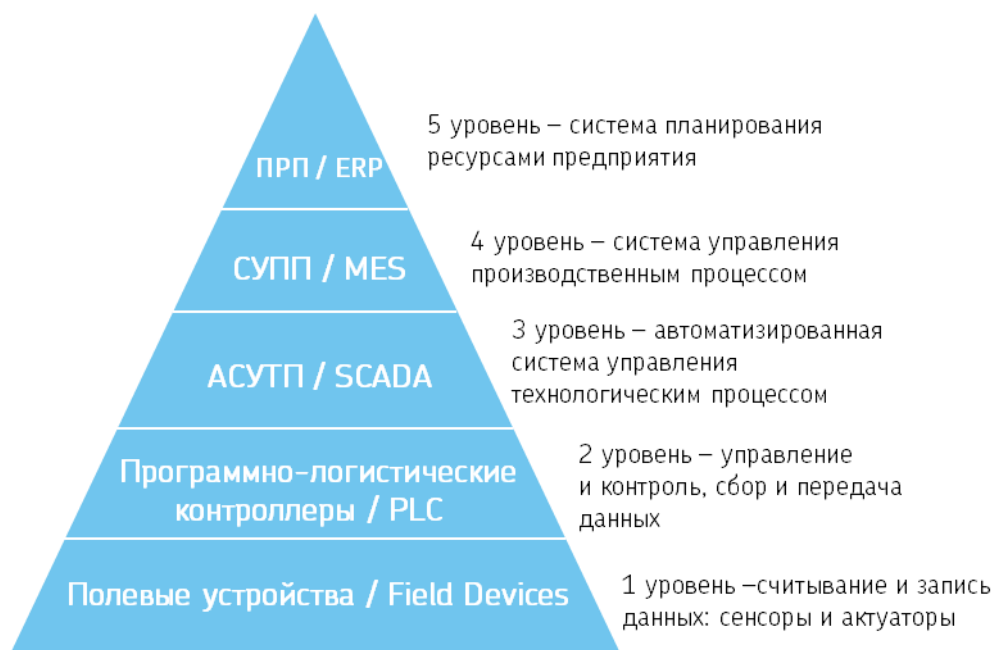
## 1.2. Архитектура современных промышленных систем и цепочек коопераций

Эволюция промышленных систем и технологий, а также III и IV промышленные революции привели к трансформации подходов по рассмотрению роли коммуникации и кооперации на различных этапах промышленного производства.

### «Пирамида автоматизации»

Традиционная «пирамида автоматизации» была сформирована в рамках III промышленной революции в 1990е годы. Можно выделить 5 уровней автоматизации, которые описывают процессы управления промышленным производством и ранжированы (снизу вверх), от более простого – к более сложному [6].

Рисунок 1. Пирамида автоматизации



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [6], 2024

Все слои пирамиды тесно связаны друг с другом. Аппаратное обеспечение определяет структуру системы, а также принципы коммуникации в рамках нее, функции привязаны к аппаратному обеспечению, коммуникация последовательно переходит с уровня на уровень пирамиды, продукт существует отдельно от иерархии [7].

Жесткая иерархия пирамиды автоматизации накладывает соответствующие ограничения на цепочки поставок и кооперации, делая их более устойчивыми и менее гибкими.

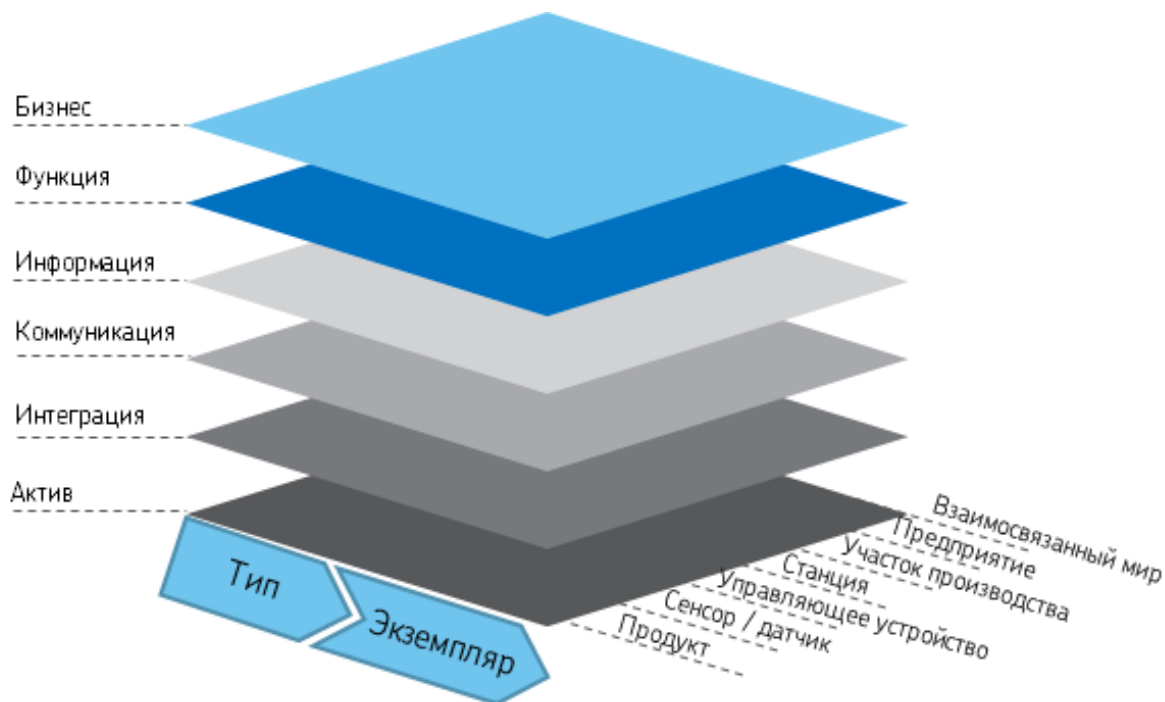


## Архитектурная модель Индустрии 4.0

Для архитектуры Индустрии 4.0 характерны гибкие системы и оборудование, распределение функций по сети. Сетевая организация позволяет преодолеть ограничения бизнеса, участники взаимодействуют друг с другом в рамках разных уровней иерархии, информация передается свободно, продукты являются частью сети [7].

Модель архитектуры рынков Индустрии 4.0, RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industrie 4.0, / Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0), созданная в Германии, структурирует производственные процессы также через три измерения: слои, жизненный цикл и поток создания ценности, а также уровни иерархии. Система слоев состоит из шести уровней, начиная с физического слоя активов и заканчивая уровнем бизнеса, который определяет бизнес-процессы, правовые рамки и общую организацию взаимодействий. Жизненный цикл делится на две основные составляющие: «Тип», охватывающий разработку и тестирование продукта, и «Экземпляр», который включает производство и эксплуатацию. Такое деление упрощает управление процессами и оптимизирует взаимодействие внутри цепочек поставок. Иерархические уровни учитывают как локальные процессы, так и глобальные взаимодействия. Модель RAMI 4.0 направлена на создание универсального стандарта для всех этапов производства, что делает ее подходящей для широкого применения [8].

Рисунок 2. Модель RAMI 4.0 (Германия)



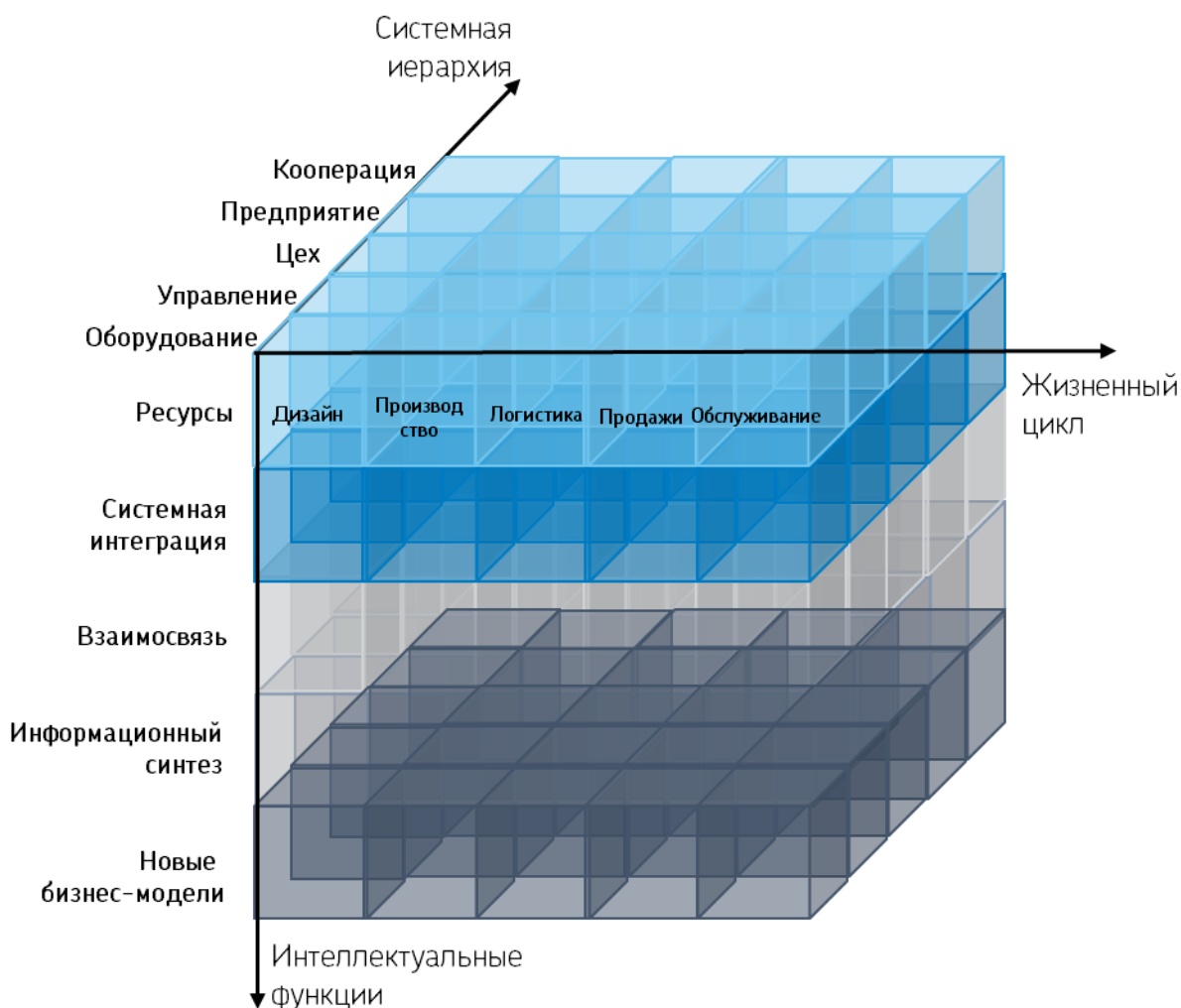
Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [7], 2024

Таким образом, RAMI 4.0 представляет собой описание не отдельной пирамиды технологий, а срез коммуникации различных участников производственного процесса по производству, распределению, потреблению продукции.

Интегрирующим уровнем для системы является с одной стороны уровень бизнеса, с другой стороны – взаимосвязанный мир, а не уровень предприятия. В рамках построенной системы игроки рынка могут свободно коммуницировать в рамках кооперации.

Модель IMSA (Intelligent Manufacturing System Architecture, Архитектура интеллектуальной производственной системы), разработанная в КНР, включает три ключевых измерения: жизненный цикл, иерархию систем и интеллектуальные функции. В основе подхода IMSA – охват всех стадий жизненного цикла продукта: от проектирования и производства до логистики, продаж и утилизации. Каждый этап направлен на создание взаимосвязанной цепочки ценности, оптимизированной с точки зрения устойчивого развития. Иерархия систем делится на пять уровней: оборудование, управление, цех, предприятие и кооперация. Данные уровни обеспечивают связь между физическими процессами и цифровыми решениями на производстве. Интеллектуальные функции модели направлены на самообучение, саморегулирование и автоматизацию, что позволяет предприятиям адаптироваться к изменяющимся условиям. Модель IMSA подчеркивает важность интеграции данных, внедрения ИТ-решений и адаптации бизнес-моделей к потребностям локальных рынков.

Рисунок 3. Модель IMSA (КНР)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [8], 2024

Обе модели охватывают весь процесс производства, от разработки до утилизации, с некоторыми различиями. Например, в RAMI 4.0 отсутствует этап маркетинга. Модели учитывают структуру производственной организации и расширение сотрудничества за пределы организации, включая взаимодействие с поставщиками и клиентами. Также обе модели рассматривают влияние ИТ-технологий на производство, уделяя внимание интеграции систем и обработке информации. При этом в IMSA больший акцент делается на ускорении инноваций за счет внедрения информационных технологий.

Таким образом, обе модели предлагают эффективные решения для интеллектуального производства. IMSA лучше подходит для реализации локальных задач и ускорения развития технологий. RAMI 4.0, в свою очередь, нацелена на унификацию и стандартизацию, что делает ее предпочтительной для международных проектов. Обе модели подразумевают широкую кооперацию участников рынка передовых производственных технологий [8].

### **Архитектура Индустрии 4.0 с позиции цепочек кооперации**

Существующие концепции архитектуры системы умного производства (Smart manufacturing system, SMS) охватывают все элементы, уровни, виды деятельности и функции, присущие умному производству. Однако отсутствует детализированное описание содержания каждой подсистемы.

Кроме того, текущие определения жизненного цикла опираются на традиционные процессы, ориентированные на массовое производство. Между тем, потребители формируют спрос на персонализированные продукты и сервисы, ориентированные на получение уникального опыта. Для адаптации к этим изменениям предприятиям необходимо трансформировать свои модели производства: от массового производства – к массовой кастомизации, или даже к полностью персонализированному подходу. Новые требования рынка формируют и запрос на трансформацию подходов к описанию цепочек добавленной стоимости и оценке кооперации.

Для учета новых вызовов исследователи предлагают сформировать Smart Manufacturing Collaborative System (SMCS) или Умную производственную систему кооперации [9].

### **Структура SMCS**

Структура SMCS формируется на основе кастомизированного производственного процесса, ориентированного на запросы клиентов, а также на кастомизации продукции, проектировании, производстве и обслуживании. Система базируется на трех ключевых измерениях: многопроцессном, многостороннем сотрудничестве на стыке разных этапов и сотрудничестве различных операторов [9].

Рисунок 4. Типы сотрудничества в рамках кастомизированного производственного процесса



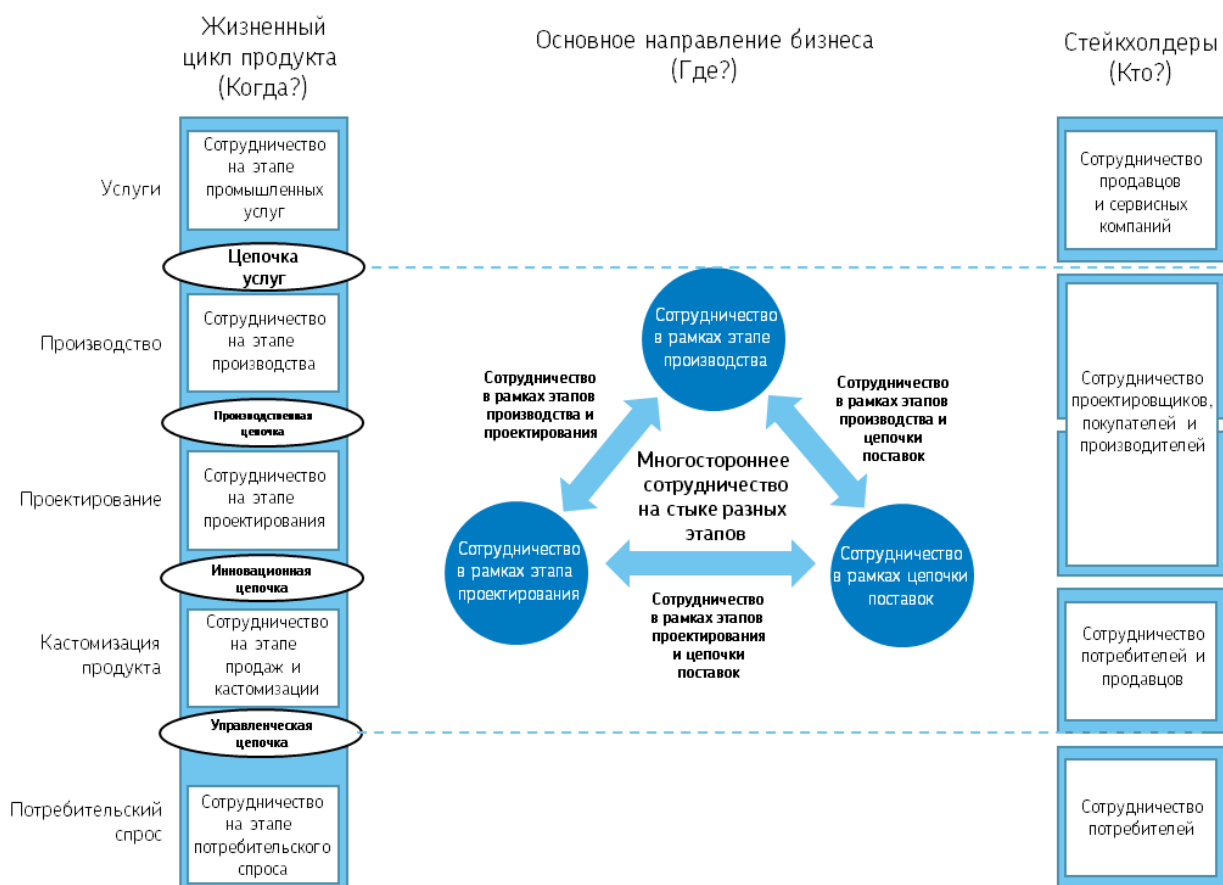
Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [9], 2024

Многопроцессное сотрудничество характерно для жизненного цикла продукта (фокус – продукт, вопрос: когда?): взаимодействие идет внутри этапов, между этапами и включает интеграцию всех процессов.

Многостороннее сотрудничество на стыке разных этапов цепочки добавленной стоимости и внутри этих этапов (фокус – цепочка добавленной стоимости, вопрос: где?).

Сотрудничество различных операторов или субъектов процесса на разных стадиях жизненного цикла продукта и в рамках цепочки добавленной стоимости (фокус – субъекты процесса, вопрос: кто?) [9].

Рисунок 5. Схема SMCS с учетом трех фокусов



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [9], 2024

SMCS предполагает формирование интегрированной схемы кооперации:

1. Подсистема многопроцессного сотрудничества помимо основных этапов включает управленческую цепочку между стадиями запроса и кастомизации, инновационную цепочку между стадиями кастомизации и проектирования, производственную цепочку между стадиями проектирования и производства, а также сервисную цепочку между стадиями производства и обслуживания.
2. Подсистема многостороннего сотрудничества на стыке разных этапов (взаимодействие между несмежными процессами) включает взаимодействие между этапами проектирования, взаимодействие в рамках производственных процессов, координацию между различными цепочками поставок, а также интеграцию между проектированием и производством, производством и цепочками поставок, проектированием и цепочками поставок. При этом цепочки поставок пронизывают весь процесс кастомизации, включая этапы формирования запроса, непосредственно кастомизации, проектирования, производства и обслуживания. Ключевой характеристикой этой подсистемы является ее замкнутость и цикличность в отличие от традиционной цепочки добавленной стоимости.
3. Подсистема сотрудничества различных операторов (взаимодействие заинтересованных сторон во всех процессах) включает сотрудничество между клиентами,

взаимодействие клиентов с продавцами, взаимодействие проектировщиков с производителями, а также взаимодействие между отделами продаж и обслуживания и другие взаимодействия. Кроме того, данная подсистема охватывает сотрудничество с внешними подрядчиками, поставщиками компонентов и провайдерами социальных ресурсов, включая поставщиков программного и аппаратного обеспечения, дизайнерских решений, логистических услуг и других специализированных ресурсов. Взаимодействие между всеми участниками осуществляется через платформы и сети [9].

### **Цепочки кооперации в рамках направления «Технет» НТИ**

Направление «Технет» (передовые производственные технологии) НТИ – кросс-отраслевое и кросс-рыночное направление, изначально формировалось как система, развитие которой зависит от плотной кооперации участников.

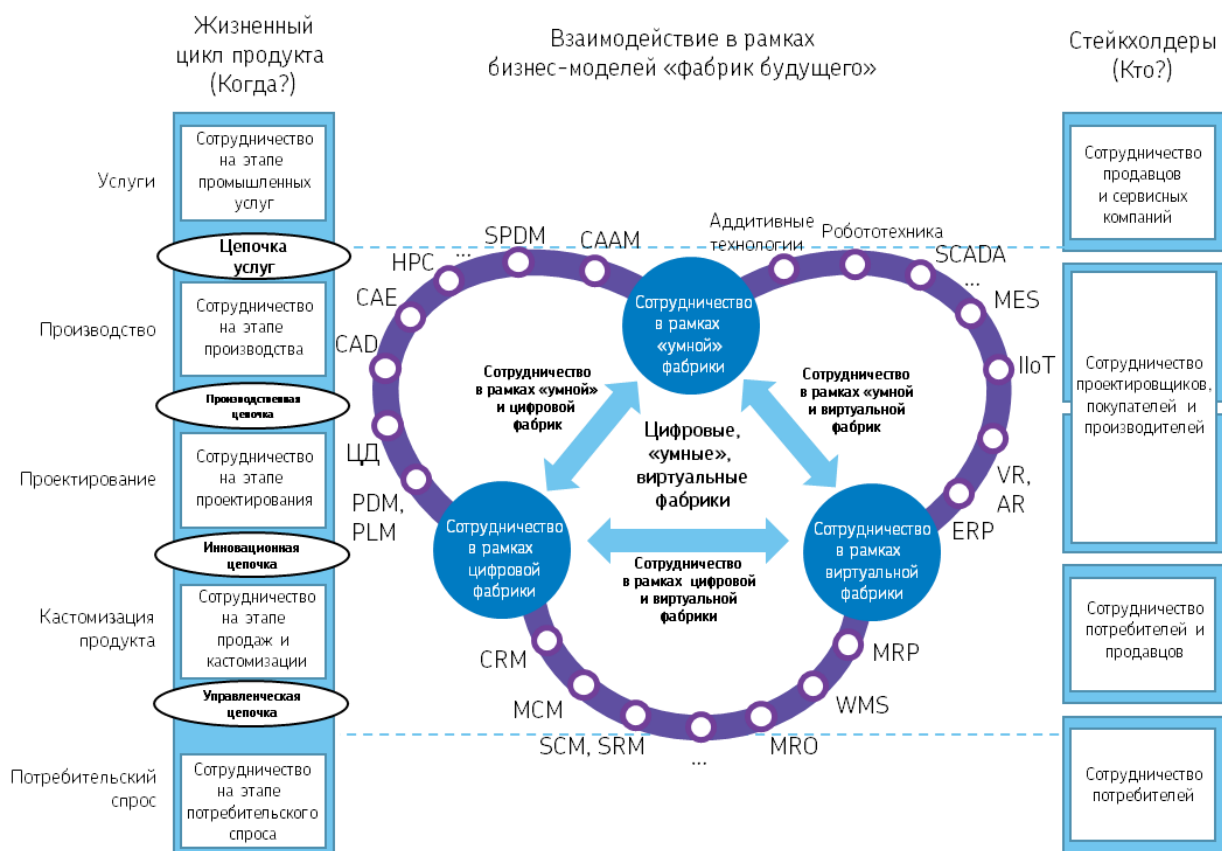
Так, одной из важнейших задач направления является преодоление Проблем-Вызовов, то есть крупных задач национального уровня, за счет формирования проектных консорциумов. Ключевая роль в преодолении таких задач принадлежит высокотехнологичным компаниям промышленности, отраслевым институтам, университетам.

Деятельность в рамках направления «Технет» НТИ фокусируется на «создании в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и кастомизированной продукции нового поколения за счет отбора и комплексирования технологий мирового уровня в технологические цепочки, называемые Цифровыми, «Умными», Виртуальными Фабриками Будущего (Digital, Smart, Virtual Factories of the Future)» [10].

Три важнейших элемента направления «Технет» НТИ, формирующих «фабрику будущего», это системы комплексных решений, обеспечивающие производство глобальной конкурентоспособной продукции: «цифровые фабрики» (проектирование), «умные фабрики» (производство), «виртуальные фабрики» (маркетинг, продажи, общее управление, цепочки поставок).

При этом ключевым элементом формирования цепочек коопераций в рамках направления «Технет» НТИ становится отбор лучших доступных «сквозных» технологий для решения конкретных задач промышленности.

Рисунок 6. Цепочки кооперации в рамках «фабрик будущего» направления «Технет» НТИ

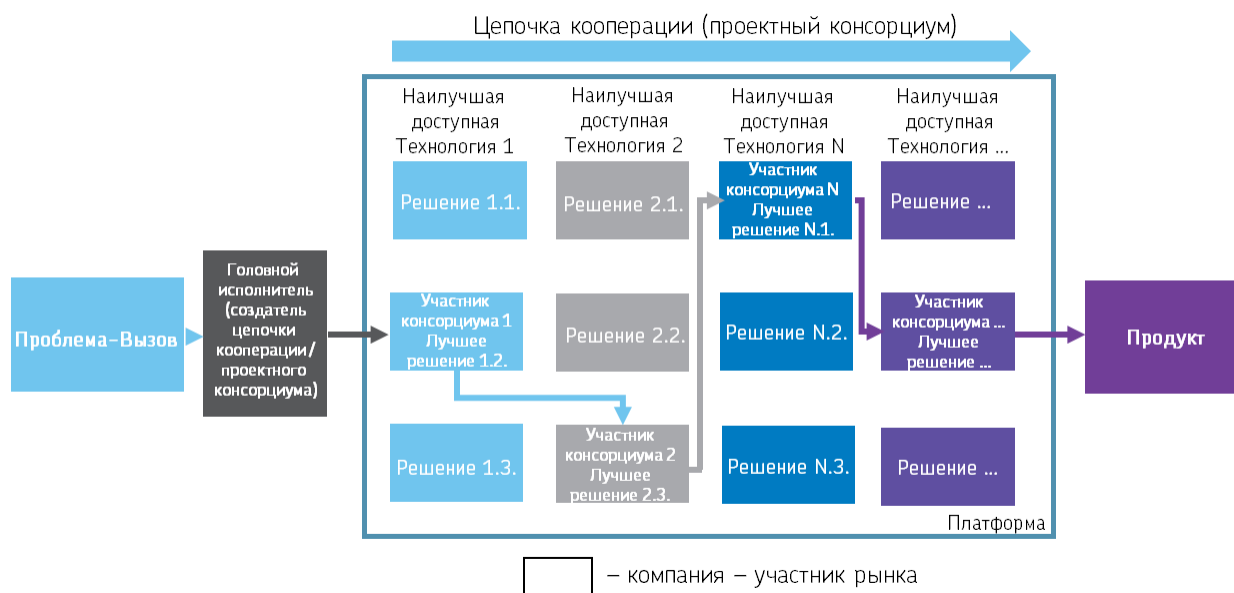


Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [9], 2024

В рамках схемы SMCS [9], в интерпретации направления «Технет» НТИ, технологии интегрируют цепочки коопераций внутри этапов сотрудничества в рамках «цифровой», «умной» и «виртуальной фабрики», а также связывают ключевые этапы создания продукции, обеспечивая коммуникацию между этапами за счет использования платформенных решений.

Цепочка кооперации «Технет» НТИ формируется на основе решения Проблем-Вызовов, стоящих перед промышленными отраслями или заказчиками.

Рисунок 7. Механизм формирования цепочек кооперации в рамках направления «Технет» НТИ



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ, 2024

Головной исполнитель получает задачу от заказчика и декомпозирует ее на подзадачи, решая, какие из них могут быть выполнены самостоятельно (головной исполнитель обладает достаточными компетенциями и технологиями), а какие требуется отдать другим игрокам рынка. После этого формируются цепочки кооперации в формате проектных консорциумов.

В рамках выбора поставщиков решений головной исполнитель ищет потенциальных членов проектного консорциума, обладающих необходимыми компетенциями и наилучшими доступными технологиями на рынке и включает поставщика в консорциум, формируя как кооперационную цепочку, так и цепочку добавленной стоимости. По результатам кооперации появляется продукт, который решает Проблему-Вызов. В ходе формирования проектного консорциума головной исполнитель особое внимание уделяет оптимизации расходов и снижению времени вывода нового продукта на рынок.



## ОТРАСЛЕВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУКТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ

В ходе исследования определена применимость технологий, составляющих основу технологических сегментов направления «Технет» НТИ, в различных отраслях промышленности, а также проведен обзор высокотехнологичных продуктов, разрабатываемых с использованием передовых производственных технологий как ключевого драйвера развития рынка «Технет». Отдельное внимание уделено функциональным возможностям систем цифрового проектирования и моделирования при применении в проекте разработки мотор-колеса скважинного трактора.

Технологические сегменты направления «Технет» НТИ, включающие **цифровое проектирование и моделирование, технологии управления жизненным циклом, технологии разработки и производства новых материалов**, а также **технологии «умного» производства**, находят широкое применение в таких обрабатывающих отраслях промышленности, как авиастроение и беспилотные авиационные системы (БАС), автомобилестроение, атомное машиностроение, вертолетостроение, двигателестроение, железнодорожный транспорт, станкостроение, судостроение, а также в ряде добывающих отраслей, таких как нефтегазовая отрасль, горнодобывающая промышленность, металлургия и пр. Технологии и продукты рынка «Технет» преимущественно применяются в машиностроении, как правило, на капиталоемких и наукоемких предприятиях, при этом внедрение технологий происходит комплексно, системно – технологии цифрового проектирования и моделирования могут быть интегрированы, например, с технологиями «умного» производства, и реализация проекта по их разворачиванию формирует технологическую экосистему на предприятии.

*Цифровое проектирование и моделирование* наряду с технологиями управления жизненным циклом обеспечивают значительное снижение затрат на разработку и производство продукции за счет управления инженерными данными, проведения цифровых (виртуальных) испытаний и «цифровой сертификации» в различных отраслях. Одним из примеров эффективного применения технологий цифрового проектирования и моделирования выступает внедрение решателя SIMULIA PowerFLOW разработки Dassault Systèmes в энергетическую отрасль [11]. Так, **LM Wind Power**, датский производитель лопастей для ветряных турбин, входящая в состав GE Vernova, совместно с Dassault Systèmes разработала инновационную методологию проектирования и моделирования оптимальных зубчатых реек лопастей, специально предназначенных для снижения шума работы ветряных турбин. Разработанная система моделирования сфокусирована на прогнозировании шума, возникающего от лопастей ветряной турбины, за счет чего обеспечивается ресурсоэффективность и снижение затрат на натурные испытания с помощью проведения цифровых (виртуальных) испытаний турбины в цифровой аэродинамической трубе. Решение SIMULIA PowerFLOW позволяет проводить моделирование потоков воздуха и аэроакустический анализ, что в дальнейшем будет способствовать реализации «цифровой сертификации» шумовых характеристик ветряных турбин.

Другим примером внедрения *цифрового проектирования и моделирования* является проект **Joby Aviation** по разворачиванию платформы 3DEXPERIENCE® от Dassault Systèmes [12]. В 2023 году компания начала реализацию проекта по созданию электрического аэротакси с вертикальным взлётом и посадкой (eVTOL), для чего было решено применять платформу 3DEXPERIENCE®, выполнять проектные работы в CATIA и отслеживать результаты инженерного анализа в ENOVIA, интегрированных в платформу.

Кроме того, решение от Dassault Systèmes обеспечивает совместную работу инженеров, проектирование конструкций с применением композиционных материалов и аддитивных технологий, верификацию и валидацию моделей, управление данными и др. Аналогично **Dronamics**, производитель грузовых беспилотных летательных аппаратов, внедрила облачную платформу 3DEXPERIENCE® для управления всеми аспектами жизненного цикла разработки БПЛА, обеспечения интеграции деталей конструкции, снижения веса конструкции, улучшения аэродинамики и проч. [13]

Швейцарская компания **CARBOMILL**, специализирующаяся на механической обработке композитных материалов и поставке продукции для аэрокосмической, оборонной и автомобильной отраслей, перевела процессы проектирования, разработки и производства с локального решения на облачную платформу 3DEXPERIENCE®, чтобы обеспечивать высокий уровень качества выпускаемых деталей [14]. Она использует отраслевое решение Digital Equipment Continuity для визуализации спроектированных деталей, внесения изменений геометрии, планирования процессов производства, проведения испытаний и оптимизации процессов механической обработки.

В рамках проекта по производству шасси для марсохода из углеродного волокна с сотовой структурой **CARBOMILL**, получившие CAD-модели шасси от заказчика, решили провести моделирование работы станка с ЧПУ для размещения компонента из углеродного волокна на столе в правильной ориентации и определения оптимальной настройки станка, а также моделирование процессов фрезерования и сверления для минимизации дорогостоящих ошибок.

Компания **Epiroc**, в свою очередь, внедрила *программный модуль* VA One для статистического энергетического анализа (SEA) от ESI в целях моделирования акустических характеристик горнодобывающего оборудования [15]. Так, производимое Epiroc буровое оборудование является источником повышенного уровня шума, опасный для работающих поблизости операторов, в связи с чем применяются поглощающие материалы для герметизации двигателя и снижения уровня шума.

С применением системы ESI команда разработчиков Epiroc оценила эффективность различных вариантов изоляции двигателя на ранних этапах проектирования, чтобы определить оптимальные акустические характеристики с учетом стоимости, веса и снижения уровня шума, а также с целью сокращения длительности разработки.

Среди отечественных примеров внедрения систем *цифрового проектирования и моделирования* следует выделить применение системы QForm разработки ООО «Кванторформ» для моделирования раскатки на прессе по заказу ПАО «Уралмашзавод» [16]. Реализация проекта включала анализ поведения материала на разных этапах процесса, исследование формы и размеров поковки, оценку напряженно-деформированного состояния поковки, подбор оптимальных режимов деформирования и, как следствие, сокращение затрат на подготовку производства и отладку технологических процессов, а также снижение сроков освоения изделия.

В интересах французской машиностроительной компании **Alstom** была проведена *разработка моделей для испытаний* вагона и целого подвижного состава, проанализированы возможности применения как иностранных, так и российских программных решений цифрового проектирования и моделирования [17].

В рамках проекта проведены различные виды цифровых испытаний, модельный анализ – расчет собственных частот, колебаний; оценка статики – гравитация, подъем в гору, контакт рельс с колесами, скручивание, наклон, подъем; расчет нагружения весом пассажиров, вагона, багажа и оценка контактных усилий на рельсы. В рамках проекта также была разработана и передана методика оценки уровня вибраций, собственных частот, которые могут приводить к разрушению, появлению недопустимого уровня шума (внешнего и внутреннего).

Аналогично программное решение CAE Fidesys разработки ООО «Фидесис» применили для *моделирования технических решений* по укреплению выработок<sup>1</sup> в интересах ООО «Институт Гипроникель» (входит в ПАО «ГМК «Норильский никель»») [18]. В рамках проекта на основании моделирования в CAE Fidesys было установлено, что основным мероприятием, позволяющим повысить устойчивость выработки в условиях повышенных горизонтальных напряжений, является укрепление горной массы за затяжкой крепи.

Другим примером применения CAE Fidesys в целях *моделирования* является реализация проекта ОАО «Пензкомпрессормаш» по разработке технологий получения композиционных материалов нового поколения и конструктивных решений для изготовления опор [19]. Так, с применением CAE Fidesys проведено полномасштабное моделирование и разработка на его основе методики расчета сопротивления материала к нагрузкам, определены предельные нагрузки, приводящие к разрушению опоры, а также создано программное обеспечение для прочностного анализа опор при изготовлении и анализе результатов.

АО «Уральский завод гражданской авиации» (АО «УЗГА») внедрило российский *программный комплекс междисциплинарного моделирования* FlowVision от компании «ТЕСИС» для разработки перспективной авиационной техники [20]. Проект по внедрению программного решения цифрового проектирования и моделирования сфокусирован на формировании мультидисциплинарного подхода, обеспечивающего анализ характеристик аэродинамики, прочности, теплопередачи, аэродинамики и динамики полета, аэроупругости, аэроакустики, обледенения, интеграции силовой установки и др. Внедрение FlowVision на УЗГА является частью масштабной работы по импортозамещению иностранных программных решений.

Применение отечественного решения FlowVision [21–23] для различных отраслей промышленности демонстрирует эффективность внедрения отечественных технологий *цифрового проектирования и моделирования* наряду с другими отечественными программными комплексами. Например, модульное платформенное решение для инженерного анализа и моделирования ЛОГОС разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (входит в Госкорпорацию «Росатом») применяется в отрасли авиастроения, автомобилестроения, двигателестроения, судостроения и ракетно-космической техники [24]. Так, решения ЛОГОС были применены в ходе различных проектов:

- в интересах морского конструкторского бюро машиностроения выполнено моделирование ходовых качеств объекта для выбора оптимальной конструкции обтекателя цистерны;

---

<sup>1</sup> В приведенном примере употребляются следующие словосочетания: «выработка» (имеется в виду «горная выработка») и «крепь» (имеется в виду «горная крепь»).

- в интересах ракетно-космического исследовательского центра проведено исследование модели ракеты в условиях пожара с учетом комбинированного теплообмена для расчета максимального времени безаварийного теплового воздействия и момента времени достижения критических температур;
- в интересах авиастроительной компании проведены испытания двигателя SaM146 на обрыв лопатки вентилятора, что направлено на сокращение длительности и стоимости сертификационных испытаний, и др.

Еще одним ярким примером выступает масштабирование применения *цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®* – отечественной *SPDM-системы управления процессами и данными компьютерного моделирования* (Simulation Process and Data Management, SPDM) [25–31], разработка Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ.

Для проведения цифровых (виртуальных) испытаний цифровая платформа CML-Bench® имеет возможность подключения различных высокопроизводительных вычислительных ресурсов (кластеров и суперкомпьютеров), а также широкого спектра специального инженерного программного обеспечения, используемого в инженерно-конструкторских разработках для выполнения инженерных и расчетных работ на различных стадиях подготовки и проведения компьютерного моделирования, цифровых (виртуальных) испытаний и обработки результатов вычислений (CAD/CAE/CAO/CAx/PDM/PLM) [25].

Применение платформы осуществляется для 10+ отраслей, включая автомобилестроение [27], железнодорожный транспорт [27], двигателестроение [27; 30], беспилотную авиацию [30], атомное машиностроение [28], нефтегазовую отрасль [29] и др. Кроме того, в платформу интегрировано более 170 программных систем и модулей, в их числе – отечественные разработки ООО «Тесис» (FlowVision), ООО «Фидесис» (CAE Fidesys), ООО «Вычислительная механика» (Универсальный механизм), ООО «Тор» (ELCUT), ООО «Кванторформ» (QForm) и др. [30]

Лицензии платформы поставлены промышленным и научно-исследовательским организациям, таким как АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК», Госкорпорация «Ростех»), ПАО «ОДК-Сатурн» (Госкорпорация «Ростех»), ООО «Центротех-Инжиниринг», АО «Прорыв» (Госкорпорация «Росатом»), Институт проблем безопасности развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН, а также образовательным учреждениям, в числе которых – Тюменский государственный университет (ТюмГУ), Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет), Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ») и др. Также цифровая платформа CML-Bench® легла в основу системы «УРАНИЯ», внедряемой на предприятиях Госкорпорации «Росатом».

*Новые материалы* также широко внедряются в различные отрасли промышленности, при этом существующий тренд повышения экологичности материалов и снижения воздействия на окружающую среду способствуют распространению материалов на основе биосырья. Например, в автомобильной промышленности применение инновационных *композиционных материалов* обеспечивает высокие конкурентные преимущества для автопроизводителей. В 2024 году компания Mercedes-Benz стала спонсором конкурса стартапов JEC World's Startup Booster [32; 33].

Это спонсорство дает Mercedes-Benz возможность исследовать новые идеи, связанные с композициями, такими как натуральные волокна и пластмассы на биологической основе, которые необходимы для создания экологичных транспортных средств, соответствия стандартам производительности и экологичности. Программа JEC World's Startup Booster способствовала интеграции композиционных биоматериалов, разработанных в рамках стартапа UBQ по переработке бытовых отходов, в производство автомобилей Mercedes-Benz.

Другим примером применения *композиционных материалов* в автомобилестроении является завершенный в 2022 году проект, финансируемый Министерством энергетики США (U.S. Department of Energy's (DOE's) Vehicle Technologies Office (VTO)), в рамках которого **Clemson Composites Center** совместно с **Делавэрским университетом** разработала дверной блок автомобиля в целях уменьшения веса и обеспечения экологичности при эксплуатации автомобиля [34; 35]. Дверной блок изготовлен из термопластичного полимерного композиционного материала Терех, армированного углеродным волокном, разработанного компанией Lanxess. В результате проекта вес конструкции снизился на 45%, при сборке используется на 64% меньше деталей, при этом конструкция на 100% пригодна для вторичной переработки. Стоит отметить, что дверной блок обладает такими же противоударными характеристиками, долговечностью, показателями шума, виброустойчивости и жесткости, что и базовая стальная дверь.

Аналогично исследовательский проект **Королевского голландского аэрокосмического центра** (Royal NLR Netherlands Aerospace Centre, NLR), компании **GKN Fokker**, **Делфтского технического университета** и **SAM|XL** (исследовательская лаборатория Делфтского технического университета) в 2023 году завершился внедрением *композиционных материалов* в отрасль авиастроения. Так, в рамках проекта «Демонстратор многофункционального фюзеляжа» (MFFD, Multi-Functional Fuselage Demonstrator) успешно изготовлена одна из крупнейших в мире термопластичных конструкций [35–37]. Проект, возглавляемый **Airbus** и финансируемый в рамках европейской программы Clean Sky 2, сфокусирован на изготовлении конструкции из композиционного материала, состоящей из более чем 400 деталей, размеры фюзеляжа составляют 8 x 4 метра. Разработка выступает в качестве нижней половины демонстратора фюзеляжа. Верхняя часть указанного демонстратора разработана **Немецким центром авиации и космонавтики** (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR) совместно с **Airbus**, **Premium AEROTEC** и **Aernnova** и так же профинансирована в рамках европейской программы Clean Sky 2 [38]. В июле 2023 года DLR представила верхнюю часть восьмиметрового демонстратора фюзеляжа [39]. В качестве верхнего слоя для обшивки фюзеляжа использовались однонаправленная термопластичная лента Cetex®, армированная углеволокном, и новая пленка для молниезащиты Cetex TC1225 LSP производства Toray, одного из лидеров рынка термопластичных композитов. Проект направлен на снижение веса конструкции при выполнении требований к прочности и экологичности материалов.

В России так же существуют примеры успешных инновационных проектов в области *термопластичных композиционных материалов*. Так, в Передовой инженерной школе СПбПУ «Цифровой инжиниринг» разработана первая в России технология и опытная установка изготовления филаментов из термопластов на основе непрерывного углеродного волокна [35; 40–44]. Преимущества углеродного волокна, такие как высокая прочность, жесткость и легкий вес, в сочетании с его устойчивостью к высоким температурам и химическим воздействиям, делают его идеальным материалом для 3D-печати [42].



Разработка осуществлялась в интересах композитного дивизиона Госкорпорации «Росатом». Производительность установки, введенной в эксплуатацию осенью 2023 года, – 500 метров филaments в час. Основу филaments составляет углеродная нить, которая затем пропитывается суспензией полимерного порошка. НИОКР в области термопластов выполнялся в рамках приоритетного направления «Материалы и технологии» Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом».

Также в России с 2016 года АО «ОДК» реализуется проект по разработке турбореактивного двигателя ПД-35 для двухдвигательных широкофюзеляжных пассажирских и транспортных самолетов [35; 45–52]. Часть конструкции двигателя состоит из *полимерных композиционных материалов*, в частности, рабочие лопатки и корпус вентилятора. За счет применения композитов вес конструкции может быть снижен на 20–30%.

Проведенный Инфраструктурным центром «Технет» СПбПУ в 2023 году анализ применения передовых производственных технологий в отрасли авиадвигателестроения показал, что абсолютное большинство компаний-лидеров отрасли авиадвигателестроения внедряют такие технологии, как *цифровое проектирование и моделирование, композиционные материалы, аддитивные технологии* в целях повышения эффективности процессов, снижения веса, повышения устойчивости, соответствия требованиям и улучшения технических параметров двигателей, таких как топливная эффективность, прочность, экономичность, а также аэродинамических характеристик и др. [53]

Сегмент технологий «умного» производства, в свою очередь, также характеризуется расширением масштабов применения в различных отраслях промышленности. Так, в России создали первую в мире *роботизированную сварочную установку с ЧПУ*, которая может вести высокоточную сварку в условиях стесненного пространства в отсеках атомных реакторов [54]. Разработка принадлежит научно-исследовательскому технологическому институту «Прогресс» (находится под управлением компании «РТ-Капитал» Госкорпорации «Ростех»).

Первый полнофункциональный образец оборудования, работающий на основе технологии аргонодуговой сварки, изготовлен для предприятий Госкорпорации «Росатом». Робот способен сваривать жаропрочную сталь в течение продолжительного времени и дает возможность контролировать параметры сварки при помощи системы видеонаблюдения. Технологический процесс полностью автоматизирован – от регулирования напряжения дуги для сварки до определения стыка соединяемых деталей.

**Renault Group** также внедряет широкий спектр *промышленных роботов* для увеличения производительности [55]. С 2022 года ABB поставила большую часть из 160 единиц крупной линейки промышленных роботов, чтобы помочь автоматизировать производственную сеть Renault на нескольких ключевых рынках. На заводе компании во Франции технология ABB поможет производить электромобили нового поколения с использованием усовершенствованных технологий «белого кузова». «Белый кузов» (BIW, Body-in-white) – это этап производства автомобиля, в рамках которого компоненты кузова автомобиля соединяются вместе до покраски и установки других компонентов, таких как двигатель, подвеска, стекла и внутренняя отделка. В дополнение к большому ассортименту промышленных роботов компания ABB предоставляет Renault программное обеспечение SafeMove, которое обеспечивает контроль движения роботов с учетом требований безопасности.

Другим примером внедрения *робототехнических систем* выступает проект итальянского стартапа **Moi Composites** по созданию первой лодки из *стекловолокна* с применением роботов KUKA KR QUANTEC и *технологий 3D-печати* [56]. В ходе проекта одна часть лодки была напечатана в Великобритании, вторая часть – в Италии, тем самым основатели Moi Composites продемонстрировали одно из преимуществ 3D-печати с использованием промышленных роботов: гибкое производство на месте. Процесс разработки и производства сопровождался применением облачных технологий, что позволило команде Moi Composites постоянно отслеживать прогресс проекта. В результате проекта получена уникальная форма лодки за счет применения стекловолокна и роботизированных установок для 3D-печати. Аналогично **Webasto**, немецкая компания-производитель компонентов для автомобильной промышленности, внедрила *роботы KUKA* в процесс производства аккумуляторов для электрических автобусов [57]. В рамках проекта развернута гибкая производственная линия Multi-Product-Line, а также налажена логистика деталей и обеспечена модульность производственных участков.

Внедрение *робототехнических систем* происходит не только в прикладных, но и образовательных и научно-исследовательских целях. Например, на базе **Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)** функционирует Научно-образовательный центр промышленной робототехники Kawasaki-Политех – это совместный проект, который реализуется в тесном сотрудничестве СПбПУ, корпорации **Kawasaki Heavy Industries**, одного из крупнейших мировых производителей роботизированных систем, и компании **ROBOWIZARD**, крупнейшего отечественного производителя систем промышленной робототехники [58; 59]. Особенностью технологического центра выступает возможность проведения испытаний различных технологий как на реальном оборудовании, так и в цифровом пространстве, а также обучение навыкам программирования и обслуживания промышленных роботов. Центр функционирует в целях проведения образовательных мероприятий, научно-исследовательских и прикладных работ как студентами и исследователями университета, так и представителями промышленности в рамках соглашений.

В рамках образовательной деятельности Kawasaki также выпустил в 2024 году *обучающего робота Astorino* для внедрения в технические образовательные организации. К преимуществам роботизированной системы компания относит простоту использования, доступную стоимость и прикладную направленность, что позволит студентам приобрести необходимые навыки в области промышленной робототехники [60]. В основе Astorino лежат 6-осевой робот, встроенная система управления и программирования, система датчиков, функции захвата и др. Кроме того, робот прост в обслуживании и не требует регулярного обновления лицензий или запасных частей, поскольку 99% деталей роботов могут быть напечатаны студентами с применением аддитивных технологий.

В части технологий для *аддитивного производства* стоит отметить внедрение системы аддитивного производства NXG XII 600 компании Nikon SLM Solutions во французский авиационный центр **Safran** [61]. Современная система NXG XII 600 будет размещена в кампусе аддитивного производства Safran (SAMC) и будет иметь важное значение для серийного производства деталей, предназначенных для текущих и перспективных программ по производству авиадвигателей. Основной задачей этой стратегической инвестиции является уникально спроектированная алюминиевая деталь из материала AlSi7Mg0.6 – F357, которая будет использоваться для интеграции демонстраторов авиадвигателей нового поколения. К преимуществам внедрения установки можно отнести обеспечение качества деталей, прочности, а также преимущества от изготовления сложной формы.

Компания 3D Systems, один из лидеров рынка *аддитивных технологий*, усилила свои позиции в автоспорте за счет приобретения командой **BWT Alpine F1** принтеров 3D Systems SLA 750 [62]. Это приобретение позволит производить 25 000 деталей в год и повысить точность процессов. BWT Alpine F1 Team использует системы SLA 750 и материал Accura Composite PIV от 3D Systems для создания моделей для испытаний в аэродинамической трубе, включая сложные аэродинамические детали с отводами давления, а также небольшие *композитные инструменты* и высокотемпературные соединительные приспособления. В компании отметили значительный рост производительности, что стало возможным благодаря сокращению времени сборки.

Также в 2023 году компания EOS, один из ключевых игроков рынка технологий для *аддитивного производства*, представила новый высокопрочный алюминиевый сплав EOS Al5X1 [63]. Сплав EOS Al5X1 обладает рядом преимуществ, включая возможность анодирования и электрополировки. EOS также подчеркивает удобство единого этапа термообработки и высокое удлинение сплава при разрыве. По данным EOS, алюминиевый сплав Al5X1 обладает более высокой прочностью по сравнению с большинством других алюминиевых предложений на рынке аддитивного производства. Эти характеристики способствуют превосходным усталостным свойствам материала, что обеспечивает интерес со стороны компаний-производителей электроники для аэрокосмической и оборонной отраслей, а также потребительских товаров. EOS подчеркивает преимущества единого этапа термообработки – достаточно шестичасового цикла при 400°C, что устраняет необходимость в дополнительных обработках, таких как термообработка, закалка в воде или закалка в масле.

Специалисты Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) в 2022 году представили линейку уникальных сплавов для *аддитивных технологий* [64]. Разработанные в институте сплавы имеют ряд преимуществ перед зарубежными материалами, в том числе по показателям термостойкости и физико-механическим свойствам.

Благодаря своим характеристикам сплавы получили широкое применение в отечественном двигателестроении – по аддитивным технологиям в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ организовано серийное производство деталей для двигателей ПД-14 и ТВ7-117СТ разработки АО «ОДК», также ведутся работы по разработке аддитивных технологий для двигателя большой тяги ПД-35 и вертолетных двигателей ВК-650В и ВК-1600В.

Кроме того, существует тренд развития беспилотного транспорта, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), беспилотные автомобили и безэкипажные катера, в связи с чем увеличивается значимость передовых производственных технологий для отечественной отрасли БАС, а также расширяется применимость технологий, преимущественно входящих в сегмент «умного» производства, в интеграции с БПЛА.

Например, интеграция БПЛА, *промышленных роботов* и устройств *промышленного интернета вещей* обеспечила снижение издержек в логистике. Так, на территории логистического центра **Amazon** в США используются БПЛА, в задачи которых входит поиск и доставка грузов [65]. На доставку легких грузов в среднем затрачивается 30 минут, при этом затраты на складскую логистику составляют 1 долл. за товар. БПЛА интегрированы с устройствами промышленного интернета вещей, а также с промышленными роботами-упаковщиками Kiva, что уменьшает ручной труд и повышает производительность.



Систему роботов и БПЛА, интегрированных в единую промышленную сеть, используют в 13 центрах Amazon по всему миру из 110 имеющихся складов, их внедрение позволило снизить расходы компании на логистику на 20%. При повсеместном внедрении данной системы ожидается экономия в размере 800 млн долл.

Аналогично БПЛА, интегрированные с системой *промышленного интернета вещей*, применяются на складах **Walmart** для инвентаризации товаров и минимизации ручного труда [65]. БПЛА делают до 30 снимков в секунду, затем информация передается в базу данных и сопоставляется с исходными данными. В итоге система без участия человека формирует мгновенный отчет по широкому ряду показателей: насколько заполнен склад, сколько осталось конкретного товара и т.д.

Другим примером внедрения системы технологий направления «Технет» является интеграция *промышленного интернета вещей* и развертывание *программной системы* мониторинга на двигателестроительном производстве. Так, проект АО «ОДК» (входит в Госкорпорацию «Ростех») направлен на подключение к промышленному интернету вещей (IIoT, Industrial Internet of Things) более 2 тыс. станков и прочего производственного оборудования [66]. Проект реализуется на 8 производственных площадках в разных регионах с применением программно-аппаратного комплекса «Диспетчер» компании «Цифра». Система мониторинга «Диспетчер» позволяет управлять загрузкой производства и выявлять причины простоев, связывает оборудование в единую сеть, служит инструментом для оптимизации технической поддержки и ремонтов, дает возможность отслеживать эффективность работы оборудования. Общая IIoT-сеть корпорации будет насчитывать более 2,5 тыс. единиц подключенного промышленного оборудования к началу 2025 года, а к 2026 году планируется увеличить ее до 4 тыс.

Параллельно АО «ОДК» реализует проект «Умный цех», в рамках которого для ПАО «ОДК-Са-турн» (входит в АО «ОДК») создается комплексная система управления производством на основе цифровой платформы ZIIoT (также разработка ГК «Цифра»), одним из поставщиков данных для которой выступает комплекс «Диспетчер».

Интеграция *промышленного интернета вещей* и *системы управления производственными процессами* (MES, Manufacturing Execution System) обеспечила сокращение производственного цикла в производстве мотоциклов и военной техники. Так, компания **Harley Davidson**, американский производитель мотоциклов и военной продукции, внедрила сеть IIoT-решений, что позволило отслеживать каждый этап сборки продукции [67]. Благодаря внедрению IIoT-системы компания в 7 раз увеличила свою акционерную стоимость и почти в 20 раз сократила производственный цикл – на сборку мотоциклов вместо 21 дня требуется 6 часов. В рамках технической реконструкции рабочих площадок были установлены датчики, контролируемые программным обеспечением класса MES. Это позволило существенно ускорить процессы перенастройки оборудования для кастомизации выпускаемых моделей, а также сократить простои и минимизировать сбои в работе оборудования.

Все большее влияние на развитие рынка «Технет» оказывает повсеместное внедрение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, которые позволяют автоматизировать ряд процессов и улучшить отдельные показатели производительности. В связи с этим наблюдается интеграция технологий, составляющих технологические сегменты «Технет», с той или иной системой искусственного интеллекта.

Например, интеграция технологий искусственного интеллекта, граничных вычислений и *промышленного интернета вещей* применяется для повышения эффективности обучения моделей искусственного интеллекта на основе промышленных данных в таких отраслях как энергетика, телекоммуникации, строительство и др. OctaiPipe, британский стартап, использует собственную комплексную систему для развертывания технологий искусственного интеллекта на периферии, что позволяет управлять распределенным обучением на основе данных с применением граничных сетей и устройств интернета вещей [68; 69]. Технология позволяет алгоритмам машинного обучения работать непосредственно на устройствах интернета вещей, обеспечивая обработку данных в режиме реального времени без необходимости подключения к облаку. Обучение моделей искусственного интеллекта происходит непосредственно на устройстве, с использованием локальных данных. Этот распределенный подход повышает конфиденциальность, сокращает время на передачу данных и позволяет проводить совместное обучение на разных устройствах.

Отдельно следует отметить создание отечественной *промышленной сети интернета вещей* высокого уровня защищенности. Так, в октябре 2024 года стало известно о разработке в России доверенной промышленной сети (ДПС) передачи данных [70]. Проект, реализация которого планируется к 2030 году, направлен на создание отечественной защищенной инфраструктуры для обмена информацией между различными уровнями промышленных систем. Разработкой сети занимаются подразделения Госкорпорации «Росатом». ДПС будет включать отечественные средства промышленной автоматизации, такие как программируемые логические контроллеры (ПЛК), контрольно-измерительные приборы и автоматику, а также системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA).

При проведении исследования отдельно рассмотрены задачи применения технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений при разработке сложных изделий машиностроения. Проведенный анализ позволяет выявить необходимость внедрения тех или иных инструментов цифрового проектирования и моделирования, а также оценить функциональные возможности внедрения цифровых платформ для создания расчетных цепочек и интеграции множества программных систем в целях повышения эффективности разрабатываемых решений в машиностроении, а также обеспечения технологической независимости.

### **Применение технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений в машиностроении**

Одним из основополагающих документов, определяющих технологическое развитие Российской Федерации, является «Концепция технологического развития на период до 2030 года», утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 года № 1315-р [71].

Согласно утвержденному документу, **технологический суверенитет** предполагает наличие в стране (под национальным контролем) критических и сквозных технологий собственных линий разработки и условий производства продукции на их основе, обеспечивающих устойчивую возможность государства и общества достигать собственные национальные цели развития и реализовывать национальные интересы.

В конце 2024 г. внесен законопроект федерального закона Российской Федерации «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (от 12 декабря 2024 г.) введено понятие **технологического лидерства Российской Федерации** – это технологическая независимость Российской Федерации, выражающаяся в разработке отечественных технологий и создании продукции с использованием таких технологий с сохранением национального контроля над критическими и сквозными технологиями на основе собственных линий разработки технологий в целях экспорта конкурентоспособной высокотехнологичной продукции и (или) замещения ею на внутреннем рынке продукции, создаваемой на базе устаревших и (или) иностранных технологий, а также превосходство таких технологий и продукции над зарубежными аналогами [72].

Одна из важнейших задач достижения технологического суверенитета и, далее, технологического лидерства – развитие технологий цифрового проектирования и моделирования, применяемых в машиностроении и обеспечивающих превосходство технологий и (или) продукции по основным параметрам (функциональным, техническим, стоимостным) над зарубежными аналогами к 2030 году, что также в полной мере соответствует Концепции технологического развития.

Рассматривая структуру экономики Российской Федерации, можно выделить крупнейшие отрасли хозяйственной деятельности, которые могут выступить в качестве драйверов развития и внедрения обеспечивающих технологический суверенитет технологий и продуктов (Рисунок 8). К ним в первую очередь, согласно вкладу отраслей в ВВП страны, относятся обрабатывающие производства (13,7%), а также добыча полезных ископаемых (12,4%).

Нефтегазовая отрасль является масштабным потребителем наукоемких технологий и высокотехнологичного оборудования, что в сочетании с высокими доходами делает данную отрасль одним из наиболее перспективных направлений для реализации политики технологического суверенитета и технологического лидерства.

Правительством запланированы инвестиции в разработку отечественного оборудования для бурения скважин и добычи нефти и газа на суше в 2023–2030 гг. в объеме 19,8 млрд руб., что следует из паспорта дорожной карты развития направления «Оборудование для бурения и добычи на суше» до 2030 г. (разработана Министерством промышленности и торговли Российской Федерации, Министерством энергетики Российской Федерации, ПАО «Газпром нефть») [73].

В дорожной карте обозначен ключевой фактор развития технологий бурения – обеспечение технологической независимости и бесперебойной работы нефтегазовых компаний при минимизации рисков добычи. При этом сохраняется высокая зависимость от импорта в нефтесервисном секторе, производстве оборудования и буровой химии [73]. Дорожная карта предусматривает создание парка оборудования для различных этапов работ: гидроразрыва пласта (ГРП), управления скважинами (РУС), геофизических исследований (MWD/LWD), многоствольного заканчивания скважин, а также **рычажных и колёсных скважинных тракторов** и другой техники [73].

Задача разработки надежных систем доставки геофизических приборов для исследования боковых и горизонтальных стволов скважины остается актуальной, и российские производители оборудования предлагают ряд технических решений. К ним относятся автономные геофизические исследовательские комплексы, доставляемые в изучаемый интервал бурения на бурильных трубах, и технологические комплексы, спускаемые на геофизическом кабеле.

Рисунок 8. Структура валового внутреннего продукта (ВВП) России по отраслям экономики в 2023 году в текущих ценах, %

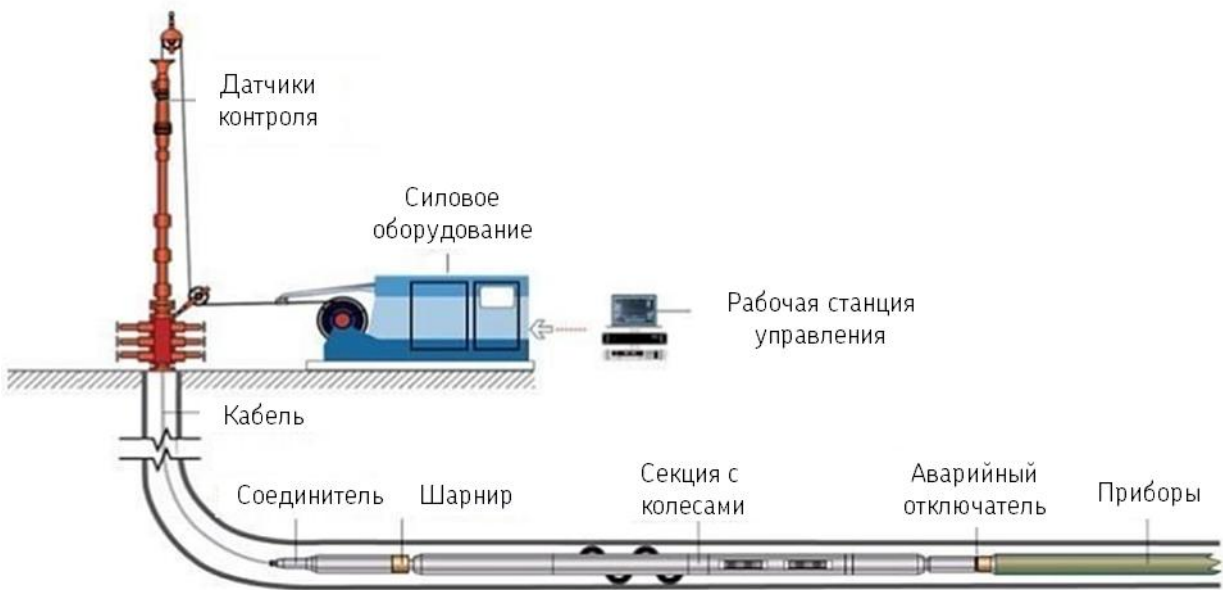


Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [74], 2024

Дополнительно можно упомянуть зарубежные разработки, в которых для спуска используется комбинация бурильных труб и геофизического кабеля, системы для проведения геофизических исследований в процессе бурения (LWD), геофизические приборы, спускаемые на гибких трубах, с пропущенным внутри геофизическим кабелем, устройства для транспортировки приборов в интервал бурения при помощи скважинных тракторов (Рисунок 9) и т.д. У каждого из перечисленных способов проведения геофизических работ есть преимущества и недостатки [75].

**Скважинный трактор** – это устройство, позволяющее доставлять инструменты и оборудование в скважину на горизонтальном участке наклонно-направленного бурения [76]. До 1996 г. основным методом разворачивания оборудования были колтюбинговые установки. Применение тракторов упростило процесс работы и повысило ее эффективность.

Рисунок 9. Механизм конструкции скважинного трактора



Источник: журнал «Геологоразведка и геологоразведочное оборудование», 2023 [76]

Рисунок 10. Конфигурация скважинного трактора Шлюмберге

### Конфигурация трактора TuffTRAC Mono

|                                                                                                                                                                                                                                            |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <p>2-приводная</p> <p>Длина:† 22,33 фута [6,80 м]</p> <p>Вес: 368 фунт-масса [167 кг]</p> <p>Стандартное применение: низкие нагрузки, облегченное заканчивание, нажимное усилие 600 фунтов-сила [2670 Н]</p>                               |  |
| <p>3-приводная</p> <p>Длина:† 25,23 фута [7,69 м]</p> <p>Вес: 424 фунт-масса [192 кг]</p> <p>Стандартное применение: низкие нагрузки, облегченное заканчивание, нажимное усилие 900 фунтов-сила [4000 Н]</p>                               |  |
| <p>4-приводная</p> <p>Длина:† 28,13 фута [8,57 м]</p> <p>Вес: 480 фунт-масса [218 кг]</p> <p>Стандартное применение: нагрузки от умеренных до больших, облегченное заканчивание, нажимное усилие 1200 фунтов-сила [5340 Н]</p>             |  |
| <p>4-приводная, сдвоенная</p> <p>Длина:† 37,17 фута [11,32 м]</p> <p>Вес: 634 фунт-масса [288 кг]</p> <p>Стандартное применение: нагрузки от умеренных до больших, облегченное заканчивание, нажимное усилие 1200 фунтов-сила [5340 Н]</p> |  |
| <p>6-приводная, сдвоенная</p> <p>Длина:† 42,97 фута [13,09 м]</p> <p>Вес: 746 фунт-масса [338 кг]</p> <p>Стандартное применение: большие нагрузки, заканчивание повышенной сложности, нажимное усилие 1800 фунтов-сила [8000 Н]</p>        |  |

†включая 2,8-фут. (0,85-м) каротажный наконечник и 1,3-фут (0,4-м) переходник

Источник: Шлюмберге, 2013 [77]

Одним из лидеров в России среди поставляемых и используемых скважинных тракторов является решение TuffTRAC Mono французского производителя Шлюмберже (Schlumberger).

Как было отмечено ранее, перед отечественной отраслью нефтедобычи стоит актуальная задача импортозамещения и формирования технологической независимости в разработке подобных решений. В настоящее время ведётся ряд исследований и разработок отечественных систем и решений для проведения геофизических исследований в горизонтальных и наклонно-направленных скважинах. Среди них можно выделить разработку специалистов ПИТЦ «Геофизика» (ГК «Нефть-сервисхолдинг»), которые совместно с партнерами «Л-Петро» разработали инновационный способ исследования наклонно-направленных и горизонтальных скважин при насосной эксплуатации [78]. Технология запатентована и внесена в Государственный реестр изобретений Российской Федерации в декабре 2023 года.

Конструктивно скважинный трактор представляет собой цепочку цилиндрических модулей, каждый из которых оснащён электронными и гидравлическими компонентами. Трактор включает одну или несколько силовых секций с тяговыми двигателями, компенсатор давления, а также верхний и нижний соединители для кабеля и инструмента соответственно.

Гидравлическое мотор-колесо в скважинном тракторе играет ключевую роль в обеспечении его движения и вращения инструмента. В отличие от механических систем, оно обеспечивает компактность, плавность хода и высокую производительность в ограниченном пространстве скважины.

Его функции включают:

- Преобразование гидравлической энергии в механическую: гидравлический мотор-колесо преобразует энергию потока рабочей жидкости под высоким давлением во вращательное движение вала, что приводит в действие буровой инструмент или другие рабочие органы скважинного трактора.
- Обеспечение движения трактора: вращение мотор-колеса обеспечивает перемещение трактора по стволу скважины. Его конструкция, обычно с использованием специальных грунтозацепов или роликов, позволяет эффективно преодолевать сопротивление стенок скважины.
- Передача крутящего момента: гидравлические мотор-колеса отличаются компактностью и высокой удельной мощностью, что особенно важно в ограниченном пространстве скважины. Они позволяют передавать значительный крутящий момент при относительно небольших габаритах.
- Регулирование скорости и крутящего момента: скорость вращения и крутящий момент мотор-колеса легко регулируются путем изменения давления и расхода рабочей жидкости, что позволяет точно контролировать работу инструмента и перемещение трактора.
- Упрощение конструкции скважинного трактора: использование гидравлического мотор-колеса упрощает конструкцию скважинного трактора по сравнению с механическими системами за счет уменьшения количества деталей, при этом обеспечивается надежность системы.
- Устойчивость к экстремальным условиям: гидравлические мотор-колеса, как правило, более устойчивы к экстремальным условиям скважины (высокое давление, температура, агрессивные среды) по сравнению с некоторыми механическими аналогами.



В целом, гидравлическое мотор-колесо является эффективным и надежным решением для привода и управления движением скважинных тракторов, обеспечивая высокую производительность и точность выполнения работ в сложных условиях.

Компоновочные решения при создании новых изделий рассматриваемого класса – скважинных тракторов – являются критическими для его эффективности, надежности и возможности выполнения заданных функций в сложных геологических условиях. Одним из важнейших параметров при выборе компоновочного решения является передача крутящего момента: система передачи крутящего момента от мотор-колеса к инструменту должна быть эффективной и надежной при исполнении всех функций мотор-колеса. Важно отметить три ключевые технические задачи при разработке мотор-колеса: размещение мотор-колеса в конструкции скважинного трактора, взаимодействие с другими компонентами и влияние на конструкцию в целом.

#### 4. Размещение мотор-колеса скважинного трактора:

- Центральное расположение: как правило, мотор-колесо размещается в центре трактора для обеспечения баланса и равномерного распределения нагрузки, что способствует устойчивому движению и предотвращает заклинивание в скважине.
- Децентрализованное расположение в некоторых конструкциях: мотор-колесо может быть смещено от центра для достижения определенных преимуществ, например, для лучшего прохождения сложных участков скважины. Однако такое расположение требует более тщательного расчёта балансировки.
- Влияние на габариты: размеры и форма мотор-колеса существенно влияют на общий диаметр трактора и его способность проходить через скважину. Оптимальный размер подбирается с учетом диаметра скважины и допустимых зазоров.

#### 5. Взаимодействие мотор-колеса с другими компонентами скважинного трактора:

- Система передачи крутящего момента: расположение мотор-колеса определяет конструкцию системы передачи крутящего момента на инструмент. Она должна быть компактной, надёжной и эффективной, при этом обеспечивать минимальные потери энергии.
- Гидравлическая система: мотор-колесо является частью гидравлической системы трактора. Его размещение должно обеспечивать удобство подключения к насосам, клапанам и другим элементам системы. Прокладка гидравлических линий должна быть оптимизирована для минимизации потерь давления и предотвращения протечек.
- Система управления: расположение мотор-колеса может влиять на размещение датчиков и элементов системы управления. Необходимо обеспечить лёгкий доступ к датчикам для мониторинга параметров работы мотор-колеса.
- Электронные компоненты: размещение электронных компонентов должно учитывать близость к мотор-колесу для обеспечения передачи данных и управления его работой. Необходимо обеспечить защиту от воздействия вибраций и других неблагоприятных факторов.

#### 6. Влияние на конструкцию скважинного трактора:

- Модульная конструкция: расположение мотор-колеса может влиять на модульную конструкцию трактора. Например, мотор-колесо может быть частью отдельного модуля, который легко заменяется или модифицируется.

- Герметичность: важно обеспечить герметичность мотор-колеса и его соединений для предотвращения утечек рабочей жидкости в скважину.
- Устойчивость к нагрузкам: мотор-колесо должно быть надежно закреплено и выдерживать значительные нагрузки при движении и работе инструмента.

Таким образом, компоновочные решения скважинного трактора и размещение мотор-колеса очень тесно взаимосвязаны. Оптимизация этого размещения критически важна для обеспечения эффективности, надежности и безопасности работы трактора в сложных геологических условиях. Технологии цифрового проектирования и моделирования являются незаменимыми инструментами для поиска оптимальных компоновочных решений при разработке глобально-конкурентоспособных тракторов нового поколения, отвечающих задачам технологического лидерства и суверенитета в нефтегазовой отрасли Российской Федерации.

Технологии цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений в машиностроении, в частности, моделирования гидравлических мотор-колес (поршневых, радиальных) для скважинных тракторов, включают инструменты моделирования динамики многомассовых систем MBS (Multi-Body Simulation), технологии вычислительной гидродинамики (CFD, Computational Fluid Dynamics), а также специализированные инженерные и аналитические методики. При моделировании динамики многомассовых систем MBS применяется более высокий уровень абстракции по сравнению с методом конечных элементов (МКЭ), что позволяет исследовать концепцию всей системы и оценить ее динамический отклик в линейной, нелинейной и частотной постановках. Результаты MBS моделирования могут быть сохранены и переданы в качестве входных данных в МКЭ-анализ для использования в качестве динамических нагрузок, что обеспечит проведение более точного анализа прочности элементов системы.

Моделирование динамики многомассовых систем используется для определения, анализа и оптимизации движения, а также нагружения механических систем. Механические устройства представляются в виде дискретных тел, соединенных посредством связей и «силовых» элементов. Подобное упрощение позволяет эффективно моделировать динамическое поведение систем и затрачивать небольшое количество времени на вычисления.

Особенностью и сложностью построения цифровой модели функционирования кинематического узла мотор-колеса, в том числе при разработке гидромоторов и гидроколес, является учет взаимодействия жидкости и элементов конструкции, соответствующий способу решения FSI (Fluid-Structure Interaction), что довольно ресурсоемко. В связи с этим актуальны выбор и обоснование применяемых иных подходов, например MBS- и CFD-инструментов, а также инженерных методик и инструментов анализа прочности.

В условиях санкционного давления и ухода большинства зарубежных лидеров в сфере цифровых технологий с российского рынка целесообразен анализ применяемых зарубежных продуктов и наличия российских аналогов по направлениям:

- Инструменты, применяемые для моделирования динамики многомассовых систем MBS (Multi-Body Simulation) (Таблица 1);
- Технологии вычислительной гидродинамики (CFD) (Таблица 2);
- Технологии анализа прочности (Strength analysis) (Таблица 3).



Помимо перечисленных подходов в процессе проектирования скважинного трактора должны быть использованы специальные инженерные методики, включая расчет и конструирование аксиально-поршневых насосов [79], расчет и конструирование радиально-поршневых гидромоторов [80].

Таблица 1. Инструменты, применяемые для моделирования динамики многомассовых систем

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SIMULIA Simpack (Dassault Systemes, Франция)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>3 основных модуля: препроцессор Simpack Pre; постпроцессор Simpack Post; решатель уравнений движения Simpack Solve.</li> <li>Дополнительный подключаемый функционал (модули) для решения специфических отраслевых задач: Engine для моделирования двигателей – цепи, ремни, шестерни привода, карданный и распределительные валы; Automotive для моделирования автомобильного транспорта – движение, управляемость, шум, вибрации и жесткость (NVH) в процессе движения, коробки передач; Другие модули, такие как Drivetrain; Flexible Body; Bearing; BioMotion; Dynamic Bushing; DOE; Contact; Control; NVH.</li> <li>Исследования динамических характеристик механических и мехатронных систем.</li> <li>Моделирование перемещений и нагрузок в механизмах в реальном масштабе времени.</li> <li>В модель для анализа в диапазоне высоких частот можно включать деформируемые тела.</li> <li>Создание деформируемых тел с помощью балочных элементов.</li> <li>Импорт деформируемых тел из конечно-элементных расчетных комплексов и пр.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Эффективное моделирование больших и сложных систем.</li> <li>Решение междисциплинарных задач.</li> <li>Управление уровнем точности для каждого вида расчетов (более подробный анализ специфических аспектов поведения систем).</li> <li>Моделирование гидродинамики, аэродинамики деформируемых тел, силовой электроники, систем управления и др.</li> <li>Использование модулей других программных пакетов.</li> <li>Программа построена на модульном принципе, что упрощает процесс моделирования и снижает стоимость.</li> <li>Подходит для объединения результатов из различного программного обеспечения в единую модель.</li> <li>Расчеты типа DoE (Design of Experiments) и параметрическая оптимизация после создания модели поведения системы и ее анализа, что улучшает свойства спроектированной системы.</li> <li>Мощный высокоскоростной решатель, быстрота проведения исследований – множество запусков решателя для оптимизационных задач не требует много расчетного времени.</li> <li>Совместное моделирование с универсальным конечно-элементным комплексом Abaqus Unified FEA двумя методами. Первый метод – модальное редуцирование МКЭ-модели для импорта в Simpack (моделирование малых отклонений деформируемых тел, вывод данных о напряжениях непосредственно в Simpack Post). Второй метод – совместное моделирование между Simpack и Abaqus (оценка больших деформаций в теле, пластических деформаций, учёт нелинейного поведения материала).</li> <li>Возможность управления с помощью программного комплекса Isight (автоматизация передачи данных между различными программными комплексами, сохранение в качестве шаблонов для последующего использования созданных цепочек, оценка пространства решения, исследование стохастических процессов, операции параметрической оптимизации с помощью набора высокоэффективных алгоритмов, эффективная обработка полученной информации).</li> <li>Топологическая оптимизация геометрической модели конструкции с помощью программного комплекса Tosca.</li> <li>Создание пользовательских элементов и подпрограмм для решателя, компонентов для графического интерфейса, организация передачи данных с другими программными комплексами, что упрощает интеграцию в существующие процессы разработки.</li> </ul> |

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p align="center"><b>MSC ADAMS</b> (MSC Software Corporation, США, с 2010 года входят в Hexagon, Швеция)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Исследование множества вариантов конструкции.</li> <li>Снижение временных и ресурсных затрат при совершенствовании изделия.</li> <li>Моделирование машин, механизмов и изделий в сборе.</li> <li>Моделирование от простых механических и электромеханических устройств до автомобилей и самолетов, железнодорожной техники, космических аппаратов и т.д.</li> <li>Выявление параметров изделия, определяющих его работоспособность и точность.</li> <li>Проверка компонентов машины на столкновения, определение габаритных размеров пространства, необходимого для ее движущихся частей.</li> <li>Определение уровня действующих нагрузок, необходимой мощности приводов.</li> <li>Оптимизация параметров изделия.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Широкий набор видов кинематических связей, упругих и диссипативных звеньев с линейными и нелинейными характеристиками, нагрузок, кинематических воздействий и т.д. для построения расчетной модели с высоким уровнем адекватности реальному изделию.</li> <li>Простота изучения и использования, интуитивно понятный интерфейс.</li> <li>Эффективные средства визуализации результатов моделирования, включая анимацию и построение графиков.</li> <li>Возможность параметризации расчетной модели: модификация параметров приводит к автоматическому изменению свойств модели и/или ее конфигурации, параметры модели могут быть связаны функциональными зависимостями и т.п.</li> <li>Работа с большим количеством входных и выходных форматов данных, результаты моделирования и расчета можно использовать в системах КЭ-анализа для оценки нагрузки.</li> <li>Наличие «вертикальных приложений» (надстроек), таких как Adams/Machinery, позволяет расширить спектр решаемых задач, упростить взаимодействие инженера с расчетной моделью на этапах ее создания, модификации, проведения расчетных исследований.</li> <li>Комплексный подход при моделировании изделий в Adams с применением упругих деталей и компонентов позволяет использовать результаты расчетов динамики в качестве историй нагружения и нагрузочных циклов (DutyCycle) для последующего исследования долговечности в системе MSC Fatigue.</li> <li>Наличие дополнительного интерфейса (ACSI) для взаимодействия с внешними расчетными пакетами и проведения совместных расчетов обеспечивает возможность моделирования сложных механических моделей с высоконелинейными (как геометрически, так и физически) упругими звеньями, подготовленными в программном комплексе Marc.</li> <li>Совместимость с программными средствами для моделирования систем автоматического регулирования и управления Easy5, Simulink, Functional Mock-up Interface (FMU) и с пользовательскими программами позволяет моделировать и исследовать сложные гетерогенные динамические системы и устройства.</li> <li>Возможность напрямую взаимодействовать с КЭ-системой MSC Nastran Embedded Fatigue для оценки долговечности узлов моделируемого изделия (расширение Adams2NEF), с системой Actran для оценки акустических свойств (плагин Adams2Actran) и др.</li> </ul> |
| <p align="center"><b>Программный комплекс «Универсальный механизм» (UM, ООО «Вычислительная механика», Россия)</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Возможность использования предприятиями железнодорожной и автомобильной промышленности, в робототехнике, машиностроении, двигателестроении, авиастроении и др. [81]</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Развитый постпроцессор: линейный анализ, статистический анализ, многовариантные расчеты, экспорт результатов и возможность провести непосредственную анимацию движения исследуемой модели в процессе расчета.</li> <li>Решение прямой и обратной задач кинематики и динамики.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Механизмы описываются как системы твердых тел, шарниров и силовых элементов.</li> <li>• Типы решаемых задач – линейный анализ, задачи динамики, в т.ч. динамики сложных систем (Multi-Body Systems), прямые и обратные задачи кинематики, анализ долговечности элементов конструкций и т.п.</li> <li>• Использование всех необходимых величин при проведении различных типов анализа – координаты, скорости, ускорения, силы реакций в шарнирах, усилия в пружинах и т.д.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• УМ включает в себя ядро и ряд дополнительных модулей, расширяющих функциональность ядра: автомобильный UM Automotive, железнодорожный UM Loco, модуль моделирования гусеничных машин UM Tracked Vehicle, импорта из CAD программ UM CAD Interfaces, моделирования упругих тел UM FEM, многовариантных расчетов и оптимизации UM Experiments, связи с Matlab/Simulink UM Control и др.</li> <li>• Возможность импорта: 3DS-файлы; ASC-файлы; модели из Matlab/Simulink; детали и сборки из КОМПАС-3D, SolidWorks, Autodesk Inventor, Unigraphics NX и Pro/ENGINEER (графические образы, инерционные параметры тел, сопряжения).</li> <li>• Возможность экспорта: BMP-файлы; AVI-файлы; анимированные GIF-файлы; измеряемые величины в форматированный текстовый файл; таблицы и графики в MS Word и Excel.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p align="center"><b>Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем EULER (ЭЙЛЕР,</b><br/> <b>разработан ООО «АвтоМеханика» с участием МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия) [82]</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Анализ работы механических систем, включающих сложную кинематику, движения, жесткие и деформируемые элементы конструкции, гидравлические, пневматические и электрические системы, системы управления и другие компоненты.</li> <li>• Применение при проектировании, отработке, испытаниях и доводке различных изделий, в научных и прикладных исследованиях.</li> <li>• Получение достоверной информации о поведении и силовых нагрузках в создаваемых изделиях на ранних стадиях проектирования.</li> <li>• Определение характеристик работы новых систем, оптимизация их параметров, сравнительный анализ различных вариантов конструкции с помощью математических моделей.</li> <li>• Оперативное проведение исследования внештатных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации существующих систем, за счет чего сокращаются сроки разработки, объем доводочных испытаний и затраты, повышается качество изделий.</li> <li>• Моделирование кинематики и динамического поведения различных механических систем (от простейших механизмов до сложных систем).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Оригинальная технология автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем.</li> <li>• На основании инженерно-технического описания динамической модели автоматически формируется математическая модель движения исследуемой механической системы в соответствии с концепцией динамического взаимодействия множества твердых и упругих тел.</li> <li>• Технология автоматизированного динамического анализа обеспечивает многократное уменьшение времени создания динамических моделей сложных объектов и высокую гибкость при их перенастройке.</li> <li>• В результате проведения расчета могут быть получены следующие характеристики: кинематические параметры движения любых характерных точек исследуемой механической системы (линейные/угловые координаты, скорости, ускорения); силы, действующие на части механической системы со стороны кинематических связей (шарниров) и силовых элементов (пружин, амортизаторов, внешней среды и т.д.); необходимые управляющие воздействия при движении исследуемой системы по заданной программе.</li> <li>• Могут проводиться различные исследования моделируемых механических систем и следующие расчеты: расчет траектории положений; расчет динамического движения; параметрический анализ; оптимизация параметров исследуемой системы; решение краевых задач; исследование методом Монте-Карло.</li> <li>• Развитые средства документирования получаемых результатов: перенос изображений, графиков, таблиц в другие приложения, создание стандартных AVI-файлов, отображающих движение моделируемой системы, и т.д.</li> </ul> |

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Особенности и преимущества |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>В качестве исходных данных для формирования моделей используются: геометрические и массово-инерционные характеристики; типы и характеристики механических связей, соединяющих части механической системы; характеристики силовых взаимодействий между частями механической системы и взаимодействий частей с внешней средой.</li> </ul> |                            |

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ, 2024

Таблица 2. Технологии вычислительной гидродинамики (CFD)

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ANSYS Fluent (ANSYS (Synopsys)<sup>2</sup> [83; 84], США)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Широкий выбор физических моделей для описания течений, турбулентности, теплообмена и химических реакций в различных процессах.</li> <li>Семейство элементов для связанного анализа – моделирования протекания жидкости через пористую среду.</li> <li>Прямой решатель для связанных задач [85].</li> <li>Элементы (SOLID226 и SOLID227) и решатели для термоэлектрических задач.</li> <li>Для коэффициента трения могут быть заданы зависимости от температуры, времени, нормального давления, расстояния скольжения, относительной скорости скольжения.</li> <li>Возможность использовать пользовательскую подпрограмму USERFRIC для задания пользовательской модели трения для двумерных и трехмерных контактных элементов.</li> <li>Программные продукты для расчета задач гидрогазодинамики полностью интегрированы в ANSYS Workbench, что позволяет пользователям, работающим в ANSYS CFX или ANSYS FLUENT создавать, связывать и повторно использовать модели, проводить параметрические исследования, выбирать тип анализа.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Однофазные течения. Сжимаемая и несжимаемая жидкости, неньютоновские жидкости, турбулентность (изотропная, анизотропная, вихреразрешающие методы), ламинарно-турбулентный переход, построение линий тока (для безынерционных частиц), акустика (экспорт источников шума и прогнозирование его уровня);</li> <li>Теплообмен. Естественная конвекция, теплопроводность и сопряженный теплообмен, теплопроводность в оболочках (в т.ч. многослойных), лучистый теплообмен, равновесный и неравновесный теплообмен в пористых средах, солнечное излучение, учет внешних источников излучения, модели неравновесного состояния;</li> <li>Многофазные течения. Дискретная фаза с формированием пленки жидкости на стенке, расчет траекторий инертных и испаряющихся частиц, распад и слияние капель при столкновениях и под действием основного потока, сгорание частиц, расчеты методом дискретных элементов, эрозия, смеси, кипение, испарение и конденсация, течения со свободной поверхностью, кавитация;</li> <li>Течения с химическими реакциями. Перенос компонентов, горение перемешанных, частично перемешанных и неперемешанных компонентов, химические реакции с конечной скоростью, образование оксидов азота и сажи, поверхностная химическая кинетика, химическая и фазовая равновесность, генерация таблицы флеймлетов, библиотека топливных компонентов;</li> </ul> |

<sup>2</sup> В 2024 году компания ANSYS объявила о продаже своих активов компании Synopsys – известному американскому разработчику систем автоматизации проектирования и производства.

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Моделирование процессов, происходящих в насосах, вентиляторах, компрессорах, газовых и гидротурбинах, в том числе при взаимодействии вращающихся и неподвижных лопаток, без необходимости моделирования полных венцов.</li> <li>• Надежность и точность расчетов обеспечивают распараллеливаемый решатель и большой выбор физических моделей.</li> <li>• Гибкий графический интерфейс предусматривает возможность настройки и автоматизации процесса моделирования.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Сопряженные расчеты. Аэроупругость и гидроупругость, аэроакустика и виброакустика, акустика, прочность, магнитогидродинамика, термоэлектрика (в т.ч. охлаждение электроники за счет теплопроводности, конвективное охлаждение), моделирование процессов образования и взаимодействия непрерывных волокон с окружающим потоком жидкости или газа;</li> <li>• Технологии оптимизации. Решатель Adjoint Solver для оптимизации геометрии, технология RBF Morph для морфинга и оптимизации сетки, параметризация моделей и параметрический анализ, корреляционный анализ, техники планирования экспериментов, анализ чувствительности, анализ 6-сигма, анализ робастности;</li> <li>• Высокопроизводительные расчеты. Декомпозиция задачи, балансировка нагрузки, распараллеливание расчетов, фотореалистичный рендеринг, автоматизированный обмен данными в среде ANSYS Workbench, совместное моделирование, гибкие настройки связывания решателей для многодисциплинарных расчетов.</li> <li>• Модели нестационарного взаимодействия «ротор-статор» для разного шага лопаток.</li> <li>• Моделирование флаттера лопаток с учетом сложных форм колебаний.</li> <li>• Гармонический расчет обтекания лопаток в частотном диапазоне.</li> <li>• Упрощенная модель пленочного охлаждения лопатки.</li> <li>• Широкий выбор моделей турбулентности.</li> <li>• Учет теплообмена излучением как в жидкостях и газах, так и в прозрачных твердых телах.</li> <li>• Мультиспектральные модели для учета зависимости параметров поглощения и рассеивания среды от длины волны.</li> <li>• Анализ пузырьковых и капельных течений, течений со свободной поверхностью.</li> <li>• Метод «погруженного тела» для расчета больших перемещений тел в потоке, не требующий перестроения расчетной сетки.</li> <li>• Моделирование течений с химическими реакциями, в том числе горения.</li> <li>• Моделирование кавитации без привлечения эмпирических моделей.</li> <li>• Совместное 3D-1D моделирование с помощью Functional Mockup Interface (FMI) (TwinBuilder, Amesim, Modelica, Adams).</li> <li>• Связанные расчеты: прочность, акустика, магнитогидродинамика, термоэлектрика.</li> <li>• Расчет внешней аэродинамики зданий и сооружений (ветровой нагрузки).</li> </ul> |

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Моделирование течений жидкости и газа в органических структурах (кровоток, дыхательные пути).</li> <li>• Эффективное распараллеливание и алгоритмы декомпозиции задачи, балансировки нагрузки и передачи данных.</li> <li>• Параметризация и оптимизация.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>FlowVision</b> (ООО «ТЕСИС», Россия)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Численные решения трехмерных стационарных и нестационарных уравнений динамики жидкости и газа, включающие законы сохранения массы, импульса (уравнения Навье–Стокса) и уравнения состояния.</li> <li>• Для расчета сложных движений жидкости и газа, которые сопровождаются дополнительными физическими явлениями, в математическую модель включаются дополнительные дифференциальные уравнения для их описания.</li> <li>• До-, сверх- и гиперзвуковое трехмерные течения.</li> <li>• Стационарные и нестационарные задачи.</li> <li>• Моделирование ньютоновской/неньютоновской жидкости.</li> <li>• Моделирование турбулентности.</li> <li>• Моделирование свободной поверхности.</li> <li>• Теплоперенос.</li> <li>• Горение многофазного течения.</li> <li>• Модель массопереноса.</li> <li>• Изотропное/анизотропное сопротивление среды.</li> <li>• Пористость.</li> <li>• Электрогидродинамика.</li> <li>• Модель зазора.</li> <li>• Учет динамики сложных систем (имплементация метода «Multi-Body Dynamics»).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Мультидисциплинарные расчеты и параметрическая оптимизация (интеграция с оптимизатором российской разработки IOSO).</li> <li>• Собственный препроцессор, возможность работы с форматами STL, VRML, MESH, ABAQUS, ANSYS, NASTRAN и др.</li> <li>• Широкий набор булевых операций, работа с поверхностями, исправление геометрии модели.</li> <li>• Препроцессор, позволяющий строить конечно-объемные сетки с высокой степенью оптимизации, использовать ортогональные сетки, пристеночное призматическое разрешение пограничного слоя, динамичную адаптацию сетки.</li> <li>• Учет сопряжения областей с использованием скользящих поверхностей и скользящей сетки.</li> <li>• Гибридные HPC-расчеты, параллельные вычисления.</li> <li>• Возможность интеграции с Abaqus, ANSYS, NASTRAN, IOSO и другими коммерческими программными системами инженерного анализа.</li> </ul> |
| <b>ЛОГОС, модуль CFD</b> (ФГУП «РЯЦ-ВНИИЭФ», Госкорпорация «Росатом», Россия)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Стационарные и нестационарные течения.</li> <li>• Подвижные сетки и границы. Расчеты на сетках с перекрытиями.</li> <li>• Расчет динамики тела, находящегося под воздействием потока (6 степеней свободы, 6DOF).</li> <li>• Модель Бринкмана–Форхгеймера для анизотропных пористых сред.</li> <li>• GGI-интерфейсы для расчета на несостыкованных сетках и учета вращения регионов.</li> <li>• Low- и All-u+ функции стенки.</li> <li>• Связанный и разделенный решатели.</li> <li>• Вязкие, невязкие, неньютоновские течения.</li> <li>• Идеальный и реальный газ (Ван-дер-Ваальс и Редлих–Квонг), реальный воздух, несжимаемая и сжимаемая жидкости.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Моделирование поведения промышленных изделий в реальных условиях эксплуатации при помощи расчетных методов.</li> <li>• Расчет процессов растрескивания топлива, выходов продуктов деления и моделирование топливного элемента.</li> <li>• Модуль «Логос Аэро–Гидро» позволяет моделировать процессы в воздушной и водной средах.</li> <li>• Поддержка операционных систем на базе ядра Linux и библиотек MPI.</li> <li>• Запуск мультидисциплинарных расчетов с помощью модуля «Логос Платформа».</li> <li>• Документация разработчика компонентов для интеграции собственных расчетных программ с модулями «Логоса» для решения специфических отраслевых мультидисциплинарных задач.</li> </ul>                                                                                                                                                                               |



| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Особенности и преимущества |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• RANS-модели (уравнения Навье–Стокса, осреднённые по Рейнольдсу): SA, SST, SSG/LRR-w(RSM).</li><li>• Вихреразрешающие модели: LES, DES, DDES, IDDES, EDES.</li><li>• Генератор синтетической турбулентности для входных граничных условий и внутренних интерфейсов.</li><li>• <math>\gamma</math>-Re<math>\theta</math> – модель ламинарно-турбулентного перехода.</li><li>• Многокомпонентные течения.</li><li>• Модель квазичастиц (дисперсные среды), тонких пленок и эрозии.</li><li>• Химические реакции и горение (Laminar FRC, EBU, EDC).</li><li>• Модель теплокомфорта.</li><li>• DO-метод переноса тепла излучением.</li><li>• Адаптация сетки к особенностям решения.</li><li>• Модель FWH для шума в дальнем поле.</li><li>• Стандартная модель атмосферы.</li><li>• Зонные подходы RANS-LES и RANS-IDDES.</li><li>• Течения со свободной поверхностью VOF.</li><li>• Модель газожидкостной смеси.</li><li>• Кавитирующие течения на основе гомогенного представления.</li><li>• Модель вентилятора.</li><li>• Пассивный скаляр.</li><li>• Интерфейс «жидкость–твёрдое тело» для задач сопряженного теплообмена.</li></ul> |                            |

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ, 2024

Таблица 3. Технологии анализа прочности (Strength analysis)

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ANSYS LS-Dyna (ANSYS (Synopsys), США)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Широкие возможности в области моделирования быстротекающих процессов, решения задач явной динамики.</li><li>• Расчеты в 3D и 2D постановках с применением solid, shell и beam элементов.</li><li>• Библиотека материалов содержит модели материалов от простых и быстрых в расчете до весьма сложных, вследствие чего возможно моделирование любых материалов при помощи явного решателя.</li><li>• Работа с элементами как в формулировке Лагранжа, так и в произвольной Лагранж-Эйлеровой формулировке (ALE).</li><li>• Расчеты с использованием методов гидродинамики гладких частиц SPH и дискретных элементов DEM.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Совместное использование с ANSYS Mechanical для задач, требующих явное и неявное решение (преднагруженное состояние, отпуск, коробление, остаточные деформации).</li><li>• Самый широкий по сравнению с аналогами набор контактов для одиночной поверхности, поверхность-поверхность, поверхность-узел.</li><li>• Автоматическое создание контактов на поверхностях и высокая скорость вычислений ввиду высокой производительности алгоритма.</li><li>• Специальные средства для crash-анализа, например, для описания работы ремней и подушек безопасности в автомобиле.</li><li>• По лицензии доступен ряд готовых стандартизированных моделей манекенов и транспортных средств.</li></ul> |

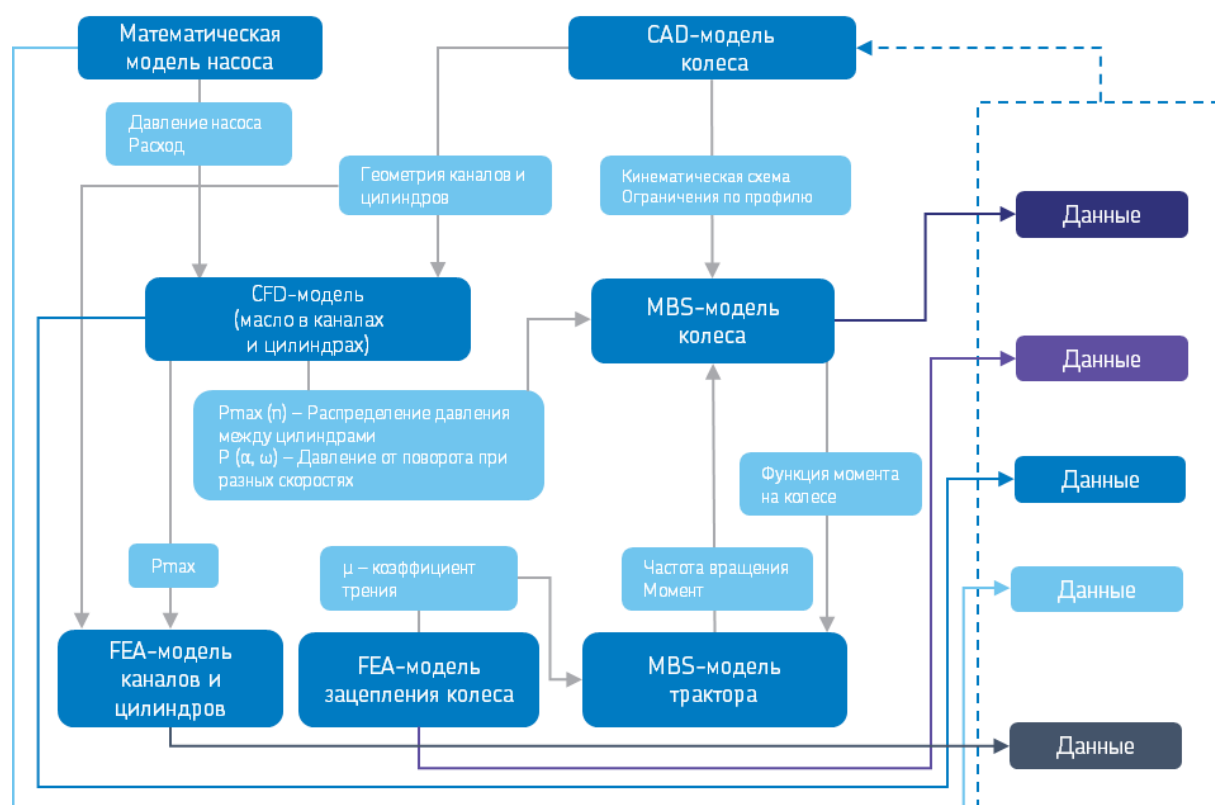


| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Методы параллельных вычислений (SMP) и (MPP) значительно повышают производительность программы путем использования нескольких процессоров, ядер или узлов.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Система прочностного анализа APM FEM для КОМПАС-3D (НТЦ «АПМ», Россия)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Типичные объекты для расчета – детали и сборки: тяги, проушины, упоры, кронштейны, уголки, рычаги, корпусные детали, опорные элементы и т.п.</li> <li>• Быстрая оценка прочности элементов с возможной оптимизацией конструкции за счет использования ассоциативной связи геометрической и расчетной моделей.</li> <li>• Деление продукта на две комплектации с условными названиями «Базовая» и «Профессиональная». «Профессиональная» версия содержит некоторые возможности расчетов в нелинейной постановке, расчет нестационарной теплопроводности и др.</li> <li>• Подготовка 3D-модели к проведению расчета прочности (упрощение геометрии).</li> <li>• Анализ и задание граничных условий (нагружение, закрепление).</li> <li>• Автоматическая генерация конечно-элементной сетки на 3D-модели.</li> <li>• Выбор необходимого типа расчета и настройка его параметров.</li> <li>• Просмотр полученных результатов и анализ значений основных расчетных характеристик (напряжений, коэффициентов запаса, перемещений и т.д.).</li> <li>• Проведение модификации модели по результатам проведенных вычислений (изменение геометрии/материала).</li> <li>• Повторное проведение расчетного анализа для подтверждения работоспособности изделия.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Доступны дополнительные функциональные возможности (опции), например, расчет поверхностных моделей (оболочек), топологическая оптимизация и др.</li> <li>• Расчет поверхностных моделей (оболочек). Опция входит в базовую поставку продукта и позволяет проводить расчет поверхностных моделей, созданных в КОМПАС-3D. При этом используются сетки из пластинчатых конечных элементов.</li> <li>• Топологическая оптимизация. Опция приобретается отдельно и позволяет провести расчет конструкции с целью определения оптимального распределения материала для улучшения массово-жесткостных характеристик изделия.</li> <li>• Единые ядро и интерфейс КОМПАС-3D.</li> <li>• Как для геометрической, так и для расчетной модели интерфейс КОМПАС-3D обеспечивает простоту и легкость работы пользователя.</li> <li>• Система работает напрямую с геометрической моделью КОМПАС-3D, не используя сторонние форматы, что снижает вероятность появления ошибок.</li> <li>• Интеграция с полнофункциональной CAE-системой APM WinMachine.</li> </ul> |
| <b>CAE Fidesys, CAE Fidesys Professional (ООО «Фидесис», Россия)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Более широкое с точки зрения функциональных возможностей решение для статических и динамических задач прочности, требующих учета конечных деформаций и других нелинейных эффектов, таких как пластичность, нелинейные вязко- и термоупругость, гиперупругость, контактное взаимодействие тел с учетом трения.</li> <li>• Точная оценка нелинейных эффектов, возникающих при конечных деформациях и их перераспределении.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Возможность проведения расчетов по CAD-моделям, имеющим дефекты (зазоры и нахлесты).</li> <li>• Сокращение времени подготовки и повышение точности расчетов при использовании метода спектральных элементов.</li> <li>• Глубокая интеграция с программным языком Python, позволяющая разрабатывать собственные решения на основе базовых возможностей пакета CAE Fidesys.</li> <li>• Наличие пакета конверторов из CAD- и CAE-пакетов для бесшовного переноса геометрических и сеточных моделей.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

| Основные возможности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Особенности и преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Термомеханический анализ упругих тел путем расчета температурных полей (стационарная и нестационарная теплопроводность) и термоупругих деформаций, вызванных ими.</li> <li>Анализ прочности деформируемого твердого тела с учетом геометрической нелинейности (конечные деформации и большие перемещения) в задачах статики и динамики.</li> <li>Проведение прочностного анализа для случая упругопластического деформирования при конечных деформациях.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Специализированное ядро для решения задач высокоскоростного взаимодействия тел, использующее уравнения состояния вещества для описания физики поведения материалов в процессе деформирования.</li> <li>Используются следующие уравнения состояния: линейное; термодинамическое малопараметрическое; широкодиапазонное малопараметрическое; кспериментальное.</li> <li>Моделирование процессов взаимодействия тел на скоростях от 10 м/с до 20 000 м/с с учетом образования осколков в результате взаимодействия.</li> <li>Поддержка как двухмерной (2D) плоской и осесимметричной постановки, так и трехмерной (3D).</li> </ul> |
| <b>ЛОГОС, модуль «Логос Прочность» (ФГУП «РФАЦ-ВНИИЭФ», Госкорпорация «Росатом», Россия)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Линейное и нелинейное приближения.</li> <li>Объемные, оболочечные, балочные элементы.</li> <li>Упругое деформирование.</li> <li>Физическая нелинейность – пластичность, ползучесть, повреждаемость, разномодульность.</li> <li>Геометрическая нелинейность – большие деформации/вращения.</li> <li>Модели механики разрушения.</li> <li>Изотропные, ортотропные, анизотропные материалы.</li> <li>Слоистые композиционные материалы.</li> <li>Гибридное распараллеливание (OpenMP + MPI).</li> <li>Технология субмоделирования.</li> <li>Учет предварительного НДС, термоНДС.</li> <li>Связное моделирование аэрогидродинамика/тепло и прочность.</li> <li>Модальный анализ для получения собственных частот конструкции с учетом и без учета демпфирования.</li> <li>Гармонический анализ для получения отклика конструкции при действии нагрузок, заданных гармоническим образом: полный метод и метод суперпозиции собственных форм.</li> <li>Анализ воздействия широкополосной случайной вибрации на конструкцию: вибрация в креплениях и нагрузки в незакрепленных частях конструкции.</li> <li>Линейный анализ потери устойчивости для получения коэффициентов запаса.</li> <li>Набор различных видов демпфирования.</li> <li>Учет контактного взаимодействия между частями конструкции.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Удобные пре/постпроцессор, позволяющие корректировать и создавать геометрию, строить сетку конечных элементов, формировать необходимые условия задачи, а также производить обработку результатов.</li> <li>Разрабатывается с учетом требований отечественных предприятий для решения реальных задач в различных отраслях промышленности, включая ОПК, атомную энергетику, авиастроение, транспортное машиностроение и др.</li> </ul>                                                                                                                                                                                            |

Представленные сведения позволяют сделать вывод о наличии российских программных продуктов по всем классам рассматриваемых задач. Однако, для наиболее обоснованного принятия решений о выборе определенных российских программных продуктов необходима процедура тестирования перечисленных программных продуктов.

Также необходимо отметить, что рассматриваемые программные продукты интегрируются при построении архитектуры моделей, совокупно представляющей CAD-модель анализируемого узла (Рисунок 11). Сложность модели также обуславливается потоками данных внутри модели, которые необходимо сформировать и взаимоувязать в процессе цифрового инжиниринга (Рисунок 11. Архитектура CAD-модели мотор-колеса



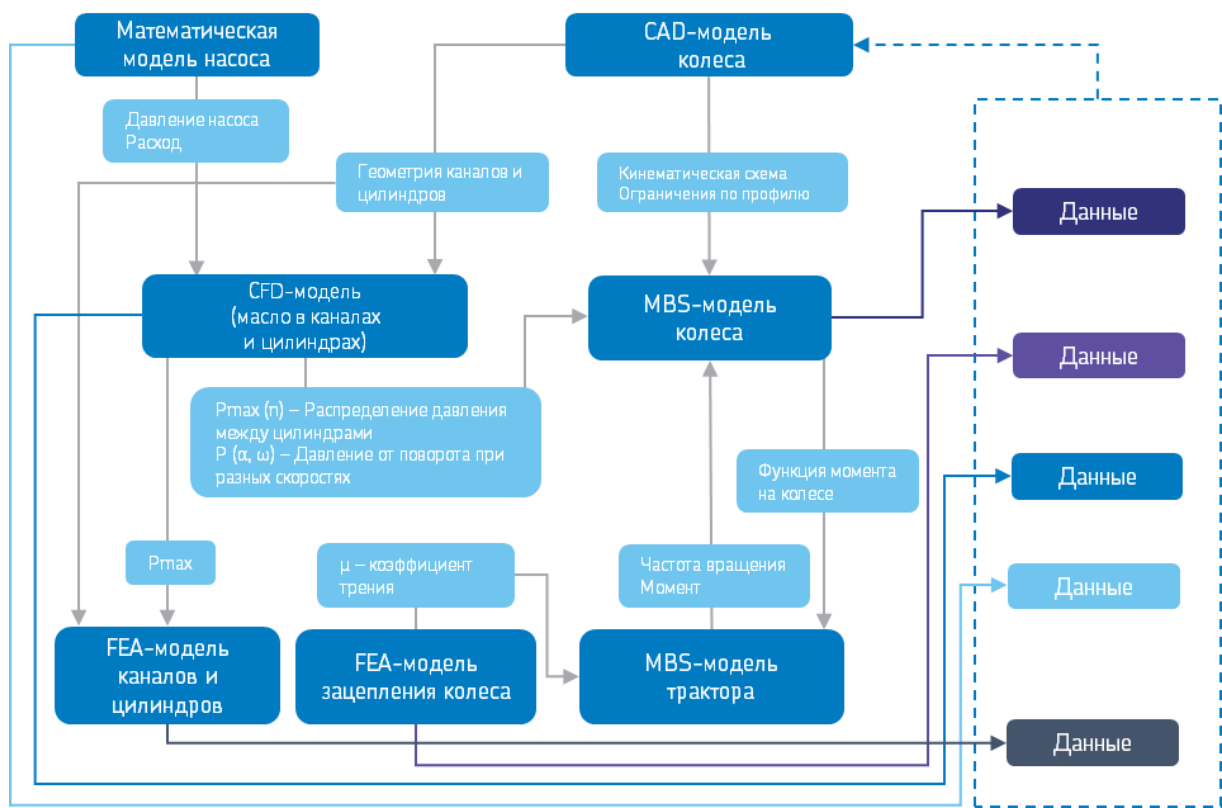
Источник: ПИШ ЦИ СПбПУ, 2024

Таблица 4). **Цифровой инжиниринг** – высокотехнологичный мультидисциплинарный наукоемкий подход к созданию объектов (изделий), который предполагает обеспечение жизненного цикла объекта (изделия) с поддержанием непрерывной связи между физическим (реальным) миром и цифровым (виртуальным) пространством, включая разработку на основе многоуровневой матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, программно-технологической платформы и системы интеллектуальных помощников, предназначенных для разработки цифровых двойников изделий, проведения цифровых (виртуальных) испытаний на цифровых (виртуальных) стендах и полигонах [86].

Как следует из определения, ключевым элементом в реализации подходов цифрового инжиниринга является технология разработки и применения цифровых двойников изделий. В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» цифровой двойник позволяет всесторонне описать изделие и системно

подойти к разработке, производству и эксплуатации изделий.

Рисунок 11. Архитектура CAD-модели мотор-колеса



Источник: ПИШ ЦИ СПбПУ, 2024

Таблица 4. Обмен данными в CAD-модели мотор-колеса (на примере мотор-колеса для скважинного трактора)

| CAD-модель колеса                        | Данные                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Математическая модель насоса             | <ul style="list-style-type: none"><li>Диаметр статора насоса</li><li>Длина насоса</li><li>Давление</li><li>Расход</li></ul>                                                                                                                                 |
| FEA-модель каналов и цилиндров           | <ul style="list-style-type: none"><li>Механические напряжения в деталях каналов и цилиндров</li></ul>                                                                                                                                                       |
| CFD-модель (масло в каналах и цилиндрах) | <ul style="list-style-type: none"><li>Конфигурация масляных каналов, цилиндров</li><li>Диаметры масляных каналов</li><li>P<sub>max</sub>(n) – Распределение давления между цилиндрами</li><li>P(α, ω) – Давление от поворота при разных скоростях</li></ul> |
| FEA-модель зацепления колеса             | <ul style="list-style-type: none"><li>Профиль поверхности колеса</li></ul>                                                                                                                                                                                  |
| MBS-модель колеса                        | <ul style="list-style-type: none"><li>Профиль статора</li><li>Передаточное число редуктора</li><li>Рабочая характеристика M(ω)</li></ul>                                                                                                                    |

Источник: ПИШ ЦИ СПбПУ, 2024

Достижение целей по обеспечению конкурентоспособности изделий и повышению скорости их вывода на рынок возможно на основе применения технологии разработки цифровых двойников изделий за счет сокращения количества циклов разработки, производства и испытаний опытных образцов изделия, а также сокращения количества изменений, вносимых в конструкцию при производстве и испытаниях опытных образцов изделий.

При таком подходе к созданию изделия основная доля его изменений происходит на стадии разработки. В рамках данной стадии применение цифровых двойников позволяет обосновывать принятые решения за счет быстрой проверки изменений, вносимых в конструкцию изделия и его составных частей, в ходе цифровых (виртуальных) испытаний, и анализировать влияние изменений показателей одних составных частей на другие. Кроме того, с помощью цифрового двойника возможно определить критические зоны и оптимальное количество датчиков, которое необходимо разместить на изделии для сбора данных для дальнейшего использования с целью обеспечения технической эксплуатации и модернизации изделия [87].

Для создания цифровых моделей и цифровых двойников изделий, проведения цифровых (виртуальных) испытаний, применения результатов математического и компьютерного моделирования и организации совместной работы по созданию цифрового двойника изделия рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников – SPDM-систему [87].

Лидирующим российским продуктом в классе SPDM является Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® [88]. Прикладные сервисы цифровой платформы CML-Bench® реализуют следующие ключевые функции [88]:

- управление проектами и заданиями;
- иерархическое представление данных проекта;
- представление графика работ по проекту в виде диаграммы Ганта;
- работа с документами/файлами разных форматов;
- управление условиями нагружения (повторение одного и того же физического эксперимента, с разной логикой работы с целевыми показателями);
- управление библиотекой требований к разрабатываемому продукту;
- отображение матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений;
- отображение дерева эволюции расчетных вариантов;
- управление цифровыми макетами;
- управление расчетными моделями;
- управление расчетными узлами;
- интеграция с высокопроизводительными кластерами (HPC – High Performance Computing);
- управление приоритизированной очередью задач;
- сбор и анализ статистики по выполненным расчетным задачам;
- формирование визуальной отчетности.

В цифровой платформе CML-Bench® реализован механизм создания расчетных цепочек, который позволяет автоматизировать процесс комплексного расчета, включающего использование нескольких видов инженерного программного обеспечения. С помощью этого механизма можно построить расчетный агрегат, в котором различные пакеты можно будет использовать последовательно (управление и данные передаются от одного пакета другому), условно (управление передается пакету при выполнении определенного условия), циклически (один и тот же пакет обрабатывает определенное количество раз) или параллельно (данные и управление из одного пакета передаются одно временно нескольким). При этом результаты расчетов будут переданы от одного компонента расчетного агрегата другому [26; 88].

Описанный подход и технологии позволят эффективно решить задачу обеспечения процесса разработки скважинного трактора и, в частности, обоснования компоновочных решений с учетом конструкции и размещения мотор-колеса. Применение расчетных цепочек позволит учесть потоки данных различных моделей, используемых при разработке скважинного трактора (CFD-модели масла в каналах и цилиндрах, FEA-модели каналов и цилиндров, MBS-модели колеса, MBS-модели трактора и пр.). Необходимо отметить, что представленные на рынке программные системы не дают возможности провести полное моделирование скважинного трактора, поскольку данное изделие представляет собой многосоставную систему. В связи с этим требуется переход с 1D- на 3D-моделирование, необходимо моделировать взаимодействие жидкость-конструкция и применять эффективные инструменты, обеспечивающие взаимодействие программных систем и взаимосвязку результатов моделирования компоновочных решений.

Предлагаемый подход нацелен на развитие технологий цифрового проектирования и моделирования для обоснования компоновочных решений в машиностроении (в частности, моделирования гидравлических мотор-колес – поршневых, радиальных и аксиальных) и достижение рассматриваемой технологией уровня готовности 5 в ходе выбора обоснованного конструктивного решения кинематического узла (мотор-колеса), формирования основных технических параметров изделия на основании моделирования, изготовления макета кинематического узла (мотор-колеса), а также разработки цифровой модели изделия «Скважинный трактор» и подтверждения работоспособности ключевых компонентов системы путем моделирования механических характеристик изделия с применением инструментов цифрового моделирования на базе цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®.

Подход основан на опыте Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» (ПИШ СПбПУ), который предполагает применение технологий цифрового инжиниринга, разработки цифровых двойников с помощью SPDM-системы – цифровой платформы CML-Bench® с применением инструментов создания автоматизированных расчетных цепочек. При этом приведенные в расчетной цепочке программные системы должны выступать «лучшими в классе» («best-in-class») / наилучшими доступными технологиями цифрового проектирования и моделирования [27; 86].

В 2022 году санкции ограничили доступ к ряду зарубежных программных продуктов, что стимулировало импортозамещение в сфере инженерного ПО, особенно CAD/CAE/PLM-систем. Проведенный анализ показал, что по каждому из методов, применяемых при разработке таких изделий, как скважинный трактор, есть отечественные программы и модули программного обеспечения (такие как «Универсальный механизм», EULER, FlowVision, ЛОГОС, APM, CAE Fidesys), которые могут быть применены в процессе разработки для повышения качества и ускорения разработки

инженерных решений.

Таким образом, ключевые эффекты, для достижения которых промышленные и инжиниринговые компании внедряют передовые производственные технологии и развертывают цифровые и интеллектуальные промышленные системы на всех этапах жизненного цикла, включают [89–92]:

- При внедрении *технологий цифрового проектирования и моделирования* – снижение временных и финансовых издержек на **разработку** продукта, увеличение показателей производительности, ускорение и оптимизация процессов проектирования, уменьшение циклов, направленных на внесение изменений и переработку, повышение результативности цифровых (виртуальных) испытаний и прохождение «цифровой сертификации» [27; 29; 30], повышение уровня соответствия требованиям и учет предельных / допустимых значений, повышение точности процессов проектирования и производственных процессов и пр.;
- При внедрении *технологий управления жизненным циклом* – снижение временных и финансовых издержек на **разработку** продукции и сопровождение на этапе **производственных и эксплуатационных процессов**, повышение качества продукции, автоматизация процессов, совершенствование процессов планирования, повышение эффективности совместной работы, уменьшение циклов, направленных на внесение изменений и переработку, оптимизация производственных и логистических цепочек, обеспечение прозрачности процессов и контролируемости, улучшение процессов мониторинга и управляемости, повышение уровня соответствия требованиям и пр.;
- При внедрении *технологий «умного» производства* – снижение временных и финансовых издержек на **производство** продукции и сопровождение на этапе **производственных и эксплуатационных процессов**, повышение качества продукции и точности производства, оптимизация затрачиваемых ресурсов, увеличение показателей производительности, автоматизация процессов и минимизация простоев, улучшение процессов мониторинга и управляемости, оптимизация производственных и логистических цепочек, обеспечение прозрачности процессов, стабильности, контролируемости, гибкости, безопасности и пр.;
- При внедрении *технологий разработки и производства новых материалов* – повышение качества продукции, оптимизация затрачиваемых ресурсов, улучшение технических характеристик изделий, прочности, термостойкости, снижение веса и количества деталей, обеспечение устойчивости, экологичности и пр.

Интеграция передовых производственных технологий обеспечивает создание единой производственной системы, нацеленной на быстрый выпуск высокотехнологичной конкурентоспособной продукции с минимальными финансовыми затратами. Результатом применения обозначенных выше технологий, составляющих основу технологических сегментов направления «Технет» НТИ, в процессе научно-инженерного анализа и производственного процесса является разработанная и произведенная инновационная продукция. Такая продукция на рынке «Технет» НТИ может быть поделена на две крупные категории:

- *Продукция и/или технологии рынка «Технет»*, то есть компоненты, материалы, изделия и технологические решения, которые в дальнейшем будут применены для разработки и производства высокотехнологичной продукции. Так, в эту категорию будут входить промышленные роботы и робототехнические решения, станки с ЧПУ и технологии управления оборудованием, программные продукты для цифрового проектирования и моделирования,



управления жизненным циклом и данными, устройства интернета вещей и сенсорики, композиционные материалы, улучшенные сплавы и др. Именно эти решения составляют основу рынка «Технет» и способствуют их дальнейшему применению в промышленности.

- *Продукция и/или технологии, возникшие в результате применения передовых производственных технологий*, как правило, продукция высокотехнологичного уровня, соответствующая отрасли применения и стадии жизненного цикла. В авиастроении, автомобилестроении, производстве различных видов транспорта, двигателестроении, энергомашиностроении и других отраслях с применением передовых производственных технологий могут быть спроектированы и далее произведены отдельные компоненты или системы, например, с применением композиционных материалов или по результатам инженерного анализа с применением технологий цифрового проектирования и моделирования; для проведения производственных процессов могут быть применены промышленные робототехнические решения, внедрены устройства промышленного интернета вещей, сенсорики и других технологий «умного» производства, применены технологии цифрового проектирования и моделирования для оптимизации технологических процессов и др. Тем самым применение технологий направления «Технет» обеспечивает выпуск высокотехнологичной конкурентоспособной продукции различных отраслей промышленности.

Таким образом, «Технет» НТИ характеризуется как кросс-рыночное, кросс-отраслевое направление, охватывающее широкий спектр отраслей промышленности и сфокусированное на разработке и развитии передовых производственных технологий, способствующих их дальнейшему применению при разработке и производстве инновационной высокотехнологичной продукции. При этом значительные преимущества от применения продуктов и технологий рынка «Технет» возникают при интеграции нескольких технологий, обеспечивающих большее увеличение производительности, качества, а также автоматизацию процессов и высокий уровень технологичности. Внедрение передовых производственных технологий способствует реализации задач, определенных документами стратегического развития страны в части формирования технологического лидерства и национальной безопасности, а также эффективной организации деятельности в области инжиниринговых услуг и устойчивому экономическому росту в приоритетных и критически важных отраслях промышленности [29].

## ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ИНОСТРАННЫХ ПОСТАВЩИКОВ И КОМПЛЕКТУЮЩИХ В РАМКАХ НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ

В рамках направления «Технет» НТИ проведен анализ зависимости российских компаний от иностранных технологических решений в разрезе технологических сегментов направления «Технет» НТИ: цифрового проектирования и моделирования, технологий управления жизненным циклом изделий, новых материалов, включая композиционные материалы, и технологий «умного» производства с фокусировкой на промышленном интернете вещей (IIoT, Industrial Internet of Things), аддитивных технологиях и робототехнике.

### Инженерное программное обеспечение (технологии цифрового проектирования и моделирования, управления жизненным циклом)

Российский рынок инженерного программного обеспечения (ПО) претерпевает существенные изменения в условиях усиления международных санкций и ухода крупных зарубежных поставщиков. До введения геополитических ограничений объем рынка в 2021 году составлял, по разным оценкам, от 39 до 65 млрд руб. [93; 94] При этом значительная его доля была представлена зарубежными решениями, такими как AutoCAD (разработчик – Autodesk), Solidworks (разработчик – Dassault Systèmes, LS Dyna (разработчик – Ansys), Teamcenter (разработчик – Siemens) и другими. Данные программные решения широко использовались в качестве систем компьютерного проектирования (САПР, CAD, Computer-Aided Design), компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering), разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ (CAM, Computer-Aided Manufacturing), управления жизненным циклом изделий (PLM, Product Lifecycle Management), управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM, Simulation Processes and Data Management) [86] и других областях. В результате ухода зарубежных разработчиков рынок сократился, по разным оценкам, на 11–20% на 2023 год [93; 95]. Уход поставщиков и ограничения на техподдержку и сопровождение их продуктов создали вызовы для российских предприятий, что формирует потребность ускоренного развития отечественных решений цифрового проектирования и моделирования.

Как отмечают эксперты, по состоянию на 2020 год в обрабатывающей промышленности доля используемого зарубежного инженерного ПО в целом составляла 69,6%, доля зарубежных CAD-систем оценивалась в 96,8%, доля зарубежных САМ-систем составляла 89,8%, доля затрат на зарубежные САЕ-системы составляла 81,77% [96; 97]. Предположительно данные показатели сохранялись по 2022 год, к концу 2024 года доля используемого отечественного программного обеспечения в промышленности возросла. Среди внедренных отечественных технологий эксперты выделяют продукты nanoCAD от ООО «Нанософт разработка», «Компас-3D» от АО «Аскон» и ряд других решений. Несмотря на рост продаж отечественного ПО, доля используемых лицензий зарубежных разработок в 2023 году составляла от 50% до 85% согласно разным оценкам [95; 98–100]. Доля использования зарубежного инженерного программного обеспечения в 2024 году оценивалась в 50–60% [101–103].

С целью достижения технологического суверенитета и технологического лидерства страны Правительство Российской Федерации начало активнее поддерживать проекты по разработке и развитию отечественного программного обеспечения.

В 2023 году было выделено более 230 млрд руб. на развитие 200 приоритетных проектов в области промышленного ПО, ключевой задачей которых стала разработка решений для поддержания полного жизненного цикла изделий с целью развития промышленного производства [93]. К ноябрю 2023 года данные решения были внедрены на более 88 тыс. предприятий, половина из которых уже применяла отечественные системы, а другая часть только внедрила полноценные российские платформы [93]. Ведущие промышленные компании также начали разработку программных продуктов в сфере проектирования объектов высокого уровня сложности, включая продукцию таких отраслей, как авиастроение и атомная энергетика [93].

В рамках стратегии импортонезависимости Министерство промышленности и торговли Российской Федерации нацелилось на полное импортозамещение зарубежных программных решений в горнодобывающей, металлургической, ракетно-космической, оборонной, химической отраслях и атомной энергетике [93]. Ожидалось, что к концу 2024 года будет завершено импортозамещение в сегментах серверного ПО, систем управления базами данных (СУБД), виртуализации, мониторинга и управления, а также операционных систем и систем контейнеризации [93].

В марте 2024 года Минпромторг предложил создать специальный совет для разработки индустриального программного обеспечения, который будет содействовать переходу предприятий на открытые архитектуры и отечественные платформы [93]. В особенности была отмечена потребность в программах для планирования ресурсов предприятий (ERP, Enterprise Resource Planning), управления производственными процессами (MES, Manufacturing Execution System), управления активами предприятий (EAM, Enterprise Asset Management), управления складами (WMS, Warehouse Management System) и инженерного анализа [93]. В ноябре 2024 года также было объявлено о разработке межотраслевых стандартов для программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами, первая версия которых будет представлена к рассмотрению в первом квартале 2025 года [93].

К 2030 году Правительство планирует обеспечить переход 80% предприятий на российское ПО, что должно стать основным направлением работы в сфере цифровой трансформации экономики и промышленности [93]. Однако внедрение отечественных технологий затрудняется рядом факторов, включающих высокую инертность рынка, доминирование нелицензированных версий иностранного ПО и нехватку квалифицированных специалистов [95; 104]. По состоянию на октябрь 2024 года лишь половина из 898 отечественных решений, внесенных в реестр «Промышленного ПО», была совместима с двумя российскими операционными системами (ОС) [93].

В декабре 2022 года Комиссия Правительства Российской Федерации по цифровому развитию утвердила «дорожную карту» по направлению «Новое индустриальное программное обеспечение» (НИПО), которая выступает логичным продолжением развития высокотехнологичного направления «Новые производственные технологии» (работа по подготовке и обновлению дорожных карт развития высокотехнологичных направлений велась в 2022 году по поручению Президента Российской Федерации) [86; 105–107]. Обновление дорожных карт высокотехнологичных направлений также проводилось в рамках деятельности созданных летом 2022 года 32 индустриальных центров компетенций (ИЦК) и 12 центров компетенций по развитию российского общесистемного и прикладного программного обеспечения (ЦКР), необходимого для замещения используемых в настоящее время зарубежных программных продуктов и решений.

Дорожная карта НИПО направлена на координацию, поддержку и регулирование проектов по созданию и внедрению инженерного программного обеспечения, разрабатываемого отечественными компаниями, стимулирующих процессы импортозамещения и формирующих технологическую независимость государства. Реализация дорожной карты координируется Госкорпорацией «Росатом» совместно с Госкорпорацией «Ростех» [108]. Часть проектов рассчитана на период до 2025 года, некоторые проекты – до 2027 года [105]. Глобальной целью реализации дорожной карты «Новое промышленное программное обеспечение» выступает достижение индекса технологической независимости 82% – это означает, что к 2030 году более 80% ИТ-потребностей предприятий будут закрыты промышленным программным обеспечением, разрабатываемым отечественными компаниями.

Кроме того, для ускорения перехода на отечественные решения для госкорпораций и компаний с госучастием установлены конкретные сроки: с 1 января 2025 года они обязаны использовать российские операционные системы, офисные приложения, антивирусные программы и системы виртуализации, а с 1 января 2026 года – СУБД [93]. В то же время Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации изменили сроки вступления в силу требования по обеспечению обязательной совместимости промышленного программного обеспечения из реестра российского ПО с отечественными ОС, сделав отсрочку для продуктов PLM, CAE, CAM, SPDM и других [93]. Первоначальные сроки исполнения требования перенесены с 2024 года на третий квартал 2025 года, а для «тяжелого» ПО – на 2026 год [93]. Также для отдельных классов ПО сроки будут зависеть от степени готовности продуктов [93]. Предоставление отсрочки предполагает работу над устранением проблем, связанных с адаптацией кода и проведением всестороннего тестирования [93].

В условиях сохраняющейся зависимости от иностранных технологий российский рынок программного обеспечения демонстрирует положительную динамику: в 2024 году спрогнозировано увеличение объема рынка инженерного ПО на 20% до 50 млрд руб., что связано с активизацией строительного и машиностроительного секторов [94]. Однако данный рост не в полной мере компенсирует утраченные позиции: объем рынка остается ниже уровня 2021 года, объем которого оценивался в 65 млрд руб. Значительное число отечественных промышленных компаний продолжает использовать зарубежные программные решения, частично внедряя отечественное ПО.

Технологические тенденции, включающие активное внедрение решений на базе искусственного интеллекта (ИИ), также будут оказывать влияние на развитие российского ПО [104]. Автоматизация процессов станет важным фактором роста в условиях кадрового дефицита и необходимости повышения производительности труда. Внедрение ИИ на данный момент осуществляется в системы CAD, CAE, PLM и ERP [95].

Таким образом, несмотря на положительные изменения в сторону роста, российский рынок инженерного программного обеспечения остается в стадии восстановления, так как сохраняются барьеры, включающие доминирование иностранных решений (около 50–60% зарубежных инженерных программных решений в 2024 году), отсутствие необходимых функциональных возможностей российских продуктов и высокую инертность перехода. Однако активные меры со стороны государства формируют основу для перехода на независимую модель цифровой трансформации промышленных компаний.

В долгосрочной перспективе российский рынок инженерного ПО обладает значительным потенциалом для роста. К 2030 году, при условии успешной реализации текущих государственных инициатив и мер поддержки, можно ожидать снижения зависимости от иностранных поставщиков технологий цифрового проектирования и моделирования, а также технологий управления жизненным циклом, и укрепления позиций отечественных разработчиков и их программных решений.

### **Новые материалы, включая композиционные материалы**

Новые материалы рассматриваются как одно из ключевых направлений, обеспечивающих инновационное и технологическое развитие промышленности. Разные страны мира реализуют государственные программы поддержки новых материалов, например, в России принят Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 года № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» [109], в рамках которого выделены технологии создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками. В соответствии с оценкой рынка новых материалов, представленной в [35], передовые композиционные материалы (advanced composites) занимают долю свыше 55% на мировом рынке новых материалов, в связи с чем анализ импортозависимости от иностранных поставщиков в разрезе новых материалов сфокусирован на отрасли композиционных материалов.

Рынок новых материалов в целом и отечественный рынок композиционных материалов в частности являются импортозависимыми как в части оборудования, так и в части сырья, применяемого для производства материалов [110]. Отечественные игроки рынка композиционных материалов сталкиваются с рядом существенных проблем: недостаточный уровень качества материалов, недостаточный уровень масштабируемости коммерческого применения решений, возникающая в связи с этим высокая стоимость приобретения и внедрения в производство отечественных материалов, функциональные ограничения имеющегося отечественного оборудования, в том числе роботизированных решений для обеспечения качества материала, функциональные ограничения инженерного ПО для анализа свойств материалов и проектирования изделий из них, недостаточность средств для финансирования НИОКР и инновационных разработок и др. В связи с этим предприятия вынуждены обращаться к иностранным поставщикам и производителям [111; 112]. При этом, как отмечают эксперты, доступные зарубежные решения из стран Азии и Ближнего Востока, в том числе оборудование и инструменты, зачастую не соответствуют требованиям заказчиков, а также усиливают импортозависимость, в связи с этим возникает потребность в создании и разработке собственных решений, технологическом перевооружении предприятий или переходе к альтернативным технологиям, например, аддитивному производству [111]. Кроме того, наблюдается некоторое отставание развития отечественного рынка в сравнении с рынком композиционных материалов развитых стран в части применения композитов в отраслях промышленности, уровня технологий, объемов производства, потребления на душу населения и стадии развития рынка [35; 110].

Полимеры, составляющие основу термопластичных композиционных материалов – перспективного направления развития рынка новых материалов, – также являются импортозависимым сегментом рынка. В последние годы наблюдается ускорение развития российского рынка полимеров, однако, как отмечают эксперты, большое количество решений основано на более ранних разработках [113].

Наличие широкого спектра отраслей применения полимеров, а также ряда технических свойств полимеров, обеспечивающих преимущества использования полимеров, формируют широкий потенциал для импортозамещения. Кроме того, существующие тенденции обеспечения экологичности и устойчивости применяемых материалов открывают новые направления развития отечественного рынка перерабатываемых полимеров и, соответственно, рынка полимерных композиционных материалов.

Так, за последние 3 года СИБУР разработал и внедрил новые марки полипропилена (Polypropylene, PP), полиэтилена (Polyethylene, PE), АБС-пластика (ABS) и других полимеров с потенциалом более 90 тыс. тонн в год для импортозамещения критичных продуктов при производстве автокомпонентов [113]. Сейчас в работе находится более 70 инициатив, сформированных совместно с ключевыми представителями отрасли, например, в области разработки специальных рецептур PP для производства трудногорючих компаундов и материалов для пассажирского автотранспорта и самолетов, материалов для изготовления подкрылок с применением вторичного материала, импортозамещение материалов для изготовления приводных ремней и др.

В инженерно-технических пластиках ведущий российский компаундер, НПП «ПОЛИПЛАСТИК», увеличил количество марок полимеров в портфеле компании для применения в автомобилестроении [113]. Среди них – материалы, которые ранее практически не производились в России, а ввозились из-за рубежа, что стало существенным вкладом в развитие технологического суверенитета России и настоящим прорывом на рынке.

Кроме того, барьером для всех российских производителей крупнотоннажных полимеров оказалось отсутствие отечественных каталитических систем [113]. Переход на новые альтернативные аналоги катализаторов азиатского производства замедлил развитие ассортимента, а также отразился на качестве серийной продукции, что требует корректировки рецептуры, например, для малых добавок, производство которых в России в настоящее время также отсутствует.

Новые задачи перед полимерной отраслью ставит и сектор безнапорных труб и смежных изделий, для изготовления которых используются не базовые полимеры, а полимерные композиционные материалы [113], обладающие определенными техническими характеристиками – жесткостью или эластичностью, термо- и светостойкостью, трудногорючестью и другими специальными свойствами. Несмотря на ограниченность ассортимента специальных добавок отечественного производства (антиоксидантов, светостабилизаторов, антипиренов, процессинговых и антистатических добавок), объемы производства полимерных композитов со специальными свойствами увеличиваются в ответ на требования внутреннего рынка.

Важно отметить импортозамещение суперконструкционных пластиков, которые применяются для производства изделий, востребованных в стратегически важных отраслях экономики – от оборонно-промышленного комплекса до производства электромобилей [113]. В России на сегодняшний день разработаны технологии синтеза полисульфонов (Polysulfone, PSU) – полиэфирсульфона (Polyethersulfone, PES), полифениленсульфона, полисульфона на базе бисфенола А, а также полиэфирэфиркетона (Polyether ether ketone, PEEK) и полифениленсульфида (Polyphenylene sulfide, PPS). Согласно оценкам маркетингового агентства MegaResearch, внедрение массового промышленного производства суперконструкционных пластиков является долгосрочной задачей, в ближайшие годы рынок импортонезависимых решений будет развиваться невысокими темпами.



Увеличивающийся спрос на суперконструкционные пластики в массовом сегменте потенциально создаст условия для более интенсивного развития внутреннего производства, ориентированного как на российских потребителей, так и на экспорт. Суперконструкционные пластики и композиционные материалы на их основе отличаются высокой прочностью, термо- и износостойкостью и в ряде случаев могут заменять металлы, в том числе при изготовлении различных изделий с помощью технологии FDM-печати (метод наплавления, Fused Deposition Modeling).

В настоящее время синтез базовых термостойких полимеров реализован на опытном заводе АО «Институт пластмасс имени Г. С. Петрова» (PSU, PES и PEEK) и в Казанском федеральном университете, где создана пилотная установка. Однако промышленный синтез суперконструкционных полимеров в настоящее время в России отсутствует. Потребности российской промышленности в ПЭЭК, по данным Госкорпорации «Ростех», удовлетворяются главным образом за счет импорта, доля которого превышает 90%. Продукция с применением данных материалов изготавливается в рамках проведения исследовательских работ, а также для нужд оборонно-промышленного комплекса в ограниченном объеме.

Эксперты полагают, что в ближайшие десятилетия легкие, прочные и долговечные термопластичные полимерные композиционные материалы станут одной из основ технологического уклада в России. Из-за отраслевой структуры спроса, в которой наибольшую долю занимают аэрокосмическая, оборонная, нефтедобывающая и нефтеперерабатывающие отрасли промышленности и медицина, импортозамещение сырья и конечной продукции будет развиваться ускоренными темпами, что позволяет надеяться на дальнейший рост рынка в среднесрочной перспективе.

Принятые меры государственной поддержки развития рынка новых материалов, в том числе композиционных материалов, способствуют адаптации рынка к ограничениям ввоза импортных материалов и оборудования. Тем не менее, существует проблема сертификации новой композитной продукции и разработки отраслевых стандартов ее производства и испытания – не разработаны единые стандарты для производства, общие методики проведения испытаний, отсутствуют сертифицированные лаборатории, которые могут проводить такие испытания [112; 114]. Например, Средне-Невский судостроительный завод длительное время потратил на получение сертификата на винил-эфирные смолы, разработанные для производства судов по гособоронзаказу – отсутствие сертификата не позволяет финансировать применение материала за счет средств контракта [112]. Важно отметить, что высокая стоимость сертификационных испытаний, в том числе проводимых зарубежом, вынуждает предприятия обращаться к таким материалам, которые с высокой долей вероятности будут доступны в ближайшие несколько десятков лет [114].

Таким образом, рынок композиционных материалов в некоторой степени адаптируется к новым условиям, развиваются новые направления и формируются импортозамещающие решения. Наращивание компетенций в импортозависимых направлениях рынка новых материалов, формирование собственной технологической базы и внедрение инноваций выступает долгосрочной стратегией развития рынка, что поддерживается государственными инициативами и мерами поддержки.

#### **Технологии «умного» производства: промышленный интернет вещей**

Промышленный интернет вещей (IIoT, Industrial Internet of Things) является важной частью цифровизации производств и значительно влияет на различные отрасли экономики.



Внедрение IIoT позволяет перейти к полностью автоматизированным системам, объединяющим данные и процессы в реальном времени, что особенно важно в условиях глобальных вызовов и требований к эффективности [115].

Одной из ключевых проблем, с которой сталкивается российский рынок IIoT, стал дефицит оборудования, контроллеров и программного обеспечения для управления данными и промышленной автоматизации, что создает необходимость в разработке отечественных аналогов программных систем, включая системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition) и системы управления производственными процессами (MES, Manufacturing Execution System) [70]. Кроме того, экспертами подчеркивается необходимость развития технологий информационной безопасности, так как в первой половине 2024 года в промышленной отрасли произошло 38% атак от количества всех кибератак в России за этот год [70].

Согласно дорожной карте национального проекта «Экономика данных», опубликованной в 2023 году, к 2030 году ожидается рост рынка отечественных решений на базе технологии IIoT до 147,25 млрд руб. (82,74% от общего объема рынка), что на порядок выше значения 2022 года – объем рынка отечественных решений составлял 79,6 млрд руб. (54,1%) [70]. Цель дорожной карты по достижению объема отечественных решений сформулирована с учетом правительственных инициатив, включающих бюджет в 90 млрд руб., выделенный на развитие индустриального ПО [70].

Тем временем, по данным, опубликованным аналитиками, российский рынок IIoT в 2023 году увеличился на 5% по сравнению с предыдущим годом и уже достиг объема в 144,4 млрд руб. [70]. Прогнозы также указывают на дальнейший рост до 189 млрд руб. к 2026 году при условии развития стратегий автоматизации производственных процессов и импортозамещения оборудования и технологий после ухода зарубежных поставщиков [70].

Работа над защищенной инфраструктурой ведется структурами госкорпорации «Росатом». Они разрабатывают доверенную промышленную сеть (ДПС), которая обеспечит надежность взаимодействия промышленных систем в условиях санкций и ухода иностранных компаний [70]. В ДПС будут входить отечественные программируемые логистические контроллеры, контрольно-измерительные приборы и автоматика, а также системы SCADA [70].

Таким образом, несмотря на наблюдаемый рост российского рынка IIoT, все еще наблюдается зависимость от иностранных поставщиков и технологий. Уход зарубежных поставщиков создал критическую потребность в импортозамещении. В долгосрочной перспективе снизить данную зависимость может развитие собственных платформ, технологий и инфраструктуры при поддержке государственными инициативами.

### **Технологии «умного» производства: аддитивные технологии**

Зависимость рынка аддитивных технологий (АТ) от иностранных поставщиков претерпела значительные изменения в последние годы из-за введенных санкций и геополитической напряженности. Уход в 2022 году западных производителей, таких как EOS, 3D Systems, Concert Laser, SLM Solutions и других, привел к нарушению прежних цепочек поставок и затруднил доступ к передовому оборудованию и материалам, необходимым для 3D-печати [116–118].

На фоне данных вызовов российские компании сосредоточились на развитии внутреннего производства и на поиске альтернативных источников поставок.

В первую очередь значимым поставщиком аддитивных технологий стал Китай, чья доля на российском рынке значительно возросла и позволила компенсировать часть утрат, вызванных уходом других иностранных компаний. Если в 2021 году большая часть поставок приходилась на США, Японию и страны Европы, то к 2023 году их доля значительно снизилась [119; 120].

Данная стратегия и комплекс благоприятных факторов, включающих государственную поддержку и реструктуризацию поставок, привели к тому, что доля отечественных производителей оборудования и материалов выросла с 54% в 2021 году до 70% в 2023 году [119].

Ключевую роль в снижении зависимости сыграла государственная политика, направленная на стимулирование технологического суверенитета. Программы субсидирования, грантов и поддержки Министерства промышленности и торговли Российской Федерации позволили локализовать производство комплектующих и оборудования для 3D-печати. В некоторых случаях уровень локализации достиг 70-80% [119].

На данный момент рынок аддитивных технологий в России демонстрирует устойчивый рост. По итогам 2023 года его объем составил более 13 млрд руб., что фактически соответствует прогнозам, изначально заложенным на 2030 год [116; 120]. Ожидается дальнейший рост, основанный на укреплении позиций российских производителей и снижении зависимости от других стран. Важным шагом в развитии отрасли стало создание Госкорпорацией «Росатом» Центров аддитивных технологий общего доступа (ЦАТОД), которые предоставляют производственные и образовательные возможности для обучения инженеров аддитивного производства и решения проблемы дефицита квалифицированных специалистов в отрасли [117; 121].

Помимо нехватки специалистов, установлению полной независимости от внешних поставщиков препятствует сохраняющаяся потребность в иностранных технологиях в области высокоточного оборудования и специализированных материалов, недостаточная развитость нормативно-правовой базы, регулирующей использование аддитивных технологий, а также изменение порога вхождения на рынок для российских компаний [116].

Значительным барьером для предприятий малого и среднего бизнеса стали высокие начальные инвестиции, включающие расходы на оборудование, программное обеспечение и обучение персонала [116].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в развитии российского рынка аддитивных технологий и роста доли отечественных производителей, полная независимость от иностранных поставщиков пока что не достигнута. Дальнейшее установление технологического суверенитета в отрасли зависит от государственной поддержки ускорения локализации и разработки собственных технологий. Тем не менее, рынок аддитивных технологий в значительной степени обеспечен отечественными разработками.

#### **Технологии «умного» производства: робототехника**

Робототехника представляет собой важное направление, способствующее повышению эффективности и модернизации промышленных процессов. Тем не менее, на данный момент Россия занимает низкие позиции в рейтинге применения промышленных роботов по странам.

По данным Международной федерации робототехники, а также ряда отраслевых экспертов, плотность промышленных роботов в России (количество роботов на 10 000 сотрудников) по состоянию на 2024 год составляет, по разным оценкам, 5–11 единиц [122–124], что значительно уступает показателям таких стран, как Южная Корея (1032 единицы), Сингапур (730 единиц) и Германия (415 единиц) [125]. По оценкам экспертов, Россия отстает от стран-лидеров на 7–8 лет [126]. Причиной низкой роботизации в России являются дефицит собственных технологий и слабое развитие российской электронной базы, недостаточная эффективность государственной поддержки малых инновационных компаний, высокая стоимость роботов зарубежного производства, относительно низкая заработная плата специалистов рабочих профессий, а также сильная зависимость от поставок иностранных технологий, комплектующих и готовых решений [127].

В настоящее время российский рынок промышленной робототехники сталкивается с серьезными трудностями, связанными с зависимостью от иностранных поставщиков. Из-за нехватки собственных производителей роботов, на российском рынке преобладали иностранные разработки. До введения международных санкций в 2022–2023 годах ключевыми поставщиками роботов на российском рынке были компании ABB (Швейцария, Швеция), KUKA (Германия), Fanuc (Япония) и Yaskawa (Япония) [128]. В исследовании 2020 года было отмечено, что более 80% рынка робототехники в России контролируют зарубежные производители [129]. Согласно данным Statista, в 2021 году крупнейший бренд на российском рынке – ABB – занимал долю, равную 64%. Вместе со вторым по величине производителем – KUKA – их совокупная доля составляла около 87% [127].

После введения санкций в 2022 году ситуация значительно усложнилась. Многие западные компании приостановили или завершили свою деятельность в России, что привело к росту затрат и сложности в обслуживании импортного оборудования. В 2022 году совокупная выручка крупных иностранных игроков на российском рынке промышленной робототехники, таких как ABB, Mitsubishi Electric, Omron, FANUC, KUKA и Staubli, сократилась более чем в два раза [127]. Таким образом, Россия столкнулась с ограничениями в доступе к разработкам крупных поставщиков промышленной робототехники.

Однако немецкая компания KUKA продолжила частично поставлять роботов в Россию, так как находится под управлением китайского холдинга Midea: в 2023–2024 гг. компания продолжила как реализацию новых проектов, так и поддержку уже установленного оборудования [130]. Помимо этого, в Россию продолжают поставки японских роботов (например, Fanuc) через параллельный импорт [131].

Наибольшее внимание сейчас уделяется закупкам оборудования у китайских производителей, которые активно расширяют свое влияние на российский рынок [132]. Тем не менее, китайская продукция считается недостаточно конкурентоспособной по сравнению с японской, южнокорейской или европейской [130].

Для минимизации последствий санкционного давления и сокращения импортозависимости органы власти предпринимают активные шаги. В целях достижения одной из национальных целей «Устойчивая и динамичная экономика» обозначена задача по вхождению Российской Федерации к 2030 году в число 25 ведущих стран мира по показателю плотности роботизации (в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года») [1].

Таким образом, к 2030 году в России на 10 000 сотрудников должно приходиться 145 роботов, что составит около 100 000 роботов по всем предприятиям страны, в то время как в настоящее время их количество составляет 12 841 единицу [133].

Реализации данной задачи будет способствовать национальный проект «Средства производства и автоматизации» и входящий в него федеральный проект «Развитие промышленной робототехники и автоматизации производства», который проходит заключительные согласования в федеральных органах власти [134]. В рамках этого проекта предусмотрены меры поддержки, такие как льготное кредитование и лизинг роботов, компенсация скидок производителям и интеграторам, субсидии на техническое перевооружение, проведение аудитов, создание центров испытаний и сертификации, а также центров развития промышленной робототехники. Помимо этого, планируется сформировать рабочую группу для разработки комплексной программы развития робототехники, включая формирование компонентной базы и списка необходимых исследований, внедрить единые стандарты жизненного цикла российских роботов и унифицировать комплектующую базу, разработать единую концепцию подготовки специалистов в области робототехники для обеспечения отрасли квалифицированными кадрами. Также разрабатываются меры для повышения спроса на отечественные робототехнические разработки [135].

Организации, занимающиеся производством и приобретением промышленной робототехники, уже имеют доступ к различным инструментам государственной поддержки. К таким механизмам относятся, в частности, субсидирование затрат на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также меры, направленные на стимулирование спроса. Для робототехники внедрены специальные условия: государство компенсирует производителю 50% предоставленной покупателю скидки, что позволяет предприятиям приобретать оборудование фактически за половину стоимости. Этот подход можно охарактеризовать как механизм, аналогичный принципу «приобретения одного робота с оплатой второго за счет государственной поддержки» [136].

Особое внимание также будет уделено импортозамещению компонентов для промышленных роботов. На данный момент в России насчитывается 73 компании, работающие в сфере робототехники. Из них 19 занимаются производством роботов, используемых на промышленных предприятиях, включая 7 компаний, специализирующихся на роботах-манипуляторах и коллаборативных роботах. Кроме того, 56 компаний сосредоточены на интеграции промышленных роботов, а лишь 5 компаний занимаются производством комплектующих для них [137]. Основные усилия отечественных производителей сосредоточены на сборке устройств из импортных компонентов. Российский компании активно закупали за рубежом ключевые компоненты для роботов, такие как серводвигатели, программируемые логические контроллеры (ПЛК), сенсоры и датчики, а также программное обеспечение. Соответственно, для уменьшения импортозависимости требуется активное развитие и поддержка отечественных производителей комплектующих для роботов.

Несмотря на зависимость от импорта, отечественные компании постепенно увеличивают объемы производства промышленных роботов. После ухода иностранных компаний с рынка России наблюдается рост отечественных производителей в некоторых секторах промышленной робототехники. Они активно нанимают высококвалифицированных специалистов, разрабатывают новые продукты и осваивают новые товарные и географические ниши [138]. В исследовании [127] представлено, что у 8 из 11 рассмотренных отечественных предприятий-производителей промышленных роботов выручка в 2022 году выросла в среднем на треть.

В 2023 году также наблюдался рост доходов производителей роботов, например, выручка пермского производителя роботов «Промобот» в 2023 году составила 220 млн руб., что на 50% больше, чем в 2022 году [139]. Как утверждают разработчики, высокий спрос на продукцию объясняется высоким качеством товаров компании, конкурентоспособной ценой благодаря использованию отечественных комплектующих, а также уходом иностранных поставщиков с рынка. В 2024 году компания начала выпуск инновационных шестиосевых роботов-манипуляторов Promobot M13 [140]. Кроме того, Госкорпорация «Росатом» представила планы по масштабированию деятельности в направлении разработки и производства промышленных роботов в целях налаживания производства до 3000 роботов в год [123].

Таким образом, отечественный рынок промышленной робототехники находится в стадии развития, но при этом продолжает испытывать значительную зависимость от иностранных поставщиков, что является сдерживающим фактором. Необходимыми условиями для обеспечения технологической независимости России являются комплексное развитие локального производства, особенно компонентов для роботов, а также поддержка отечественных компаний со стороны государства и снижение импорта.

Согласно результатам проведенного анализа, в России наблюдается высокая импортозависимость по технологическим сегментам, составляющим основу направления «Технет» НТИ. Наиболее критический уровень импортозависимости наблюдается для технологий и продуктов цифрового проектирования и моделирования, управления жизненным циклом, а также робототехнических систем, однако правительством и госкорпорациями предпринимаются усиленные меры, направленные на разработку, развитие и внедрение отечественных программных систем и промышленных роботов.

На рынке новых материалов и рынке промышленного интернета вещей наблюдается умеренный уровень импортозависимости, ведутся работы по импортозамещению зарубежных технологий. Наименьший уровень импортозависимости наблюдается для продуктов аддитивных технологий, при этом предприятиями используется высокая доля зарубежного оборудования для аддитивного производства.

БЕНЧМАРКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ  
НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ

Для анализа рынка технологий направления «Технет» НТИ важно использовать бенчмарки показателей. Они позволяют осуществить сравнительный анализ показателей рынка, отдельных сегментов и компаний внутри этих сегментов, что является основой для оценки конкурентоспособности и выявления перспективных направлений. Благодаря выявленным показателям можно оценить текущее состояние технологий и определить основные направления их дальнейшего развития.

Для оценки текущего состояния и перспектив развития рынка технологий сегмента «Технет» выделены три ключевые группы бенчмарков показателей: технические характеристики, финансово-рыночные показатели и показатели внедрения и использования технологий. Эти группы позволяют оценить основные аспекты разработки, распространения и применения технологий в промышленности.

Таблица 5. Типы бенчмарков показателей для технологических сегментов направления «Технет»

| Технологические сегменты направления «Технет» | Технологические характеристики | Финансово-рыночные показатели | Показатели внедрения и использования технологий |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| Цифровое проектирование и моделирование       | ✓                              | ✓                             | ✓                                               |
| Технологии управления жизненным циклом        | ✓                              | ✓                             | ✓                                               |
| Новые материалы                               | ✓                              | ✓                             | ✓                                               |
| Технологии «умного» производства              | ✓                              | ✓                             | ✓                                               |

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ, 2024

**Технические характеристики** представляют собой набор показателей, которые описывают функциональные возможности технологий. Благодаря этим характеристикам можно оценить уровень производительности, эффективности и потенциал для масштабирования технологий и их внедрения в промышленность.

Эта группа показателей позволяет произвести количественное и качественное сравнение технологий по важным параметрам, таким как точность, скорость обработки и уровень автоматизации. Эти характеристики являются существенными для оценки конкурентоспособности сегментов рынка и технологий.



Для оценки технологий в сегменте *цифрового проектирования и моделирования* могут быть использованы следующие бенчмарки показателей:

- *Точность результатов расчета.* Ключевым количественным показателем для оценки успешности технологий является их точность. Показатель необходимой точности зависит от задачи, которую система выполняет. Например, для CAD- и CAM-систем может быть использован показатель точности сканирования, то есть соответствие размеров сканируемого объекта и цифровой модели [141]. Также точность оценивают наряду с оценкой корректности и неопределенности результатов анализа. Это связано с процессами верификации, валидации и оценки неопределенности (Verification, Validation and Uncertainty Quantification, VVUQ), в рамках которых оценивается корректность решения [142]. Благодаря метрике точности можно оценить, какая из сравниваемых систем выполняет задачу ближе к ожидаемому результату;
- *Скорость.* Скорость является ещё одним количественным показателем, по которому можно сравнивать конкурирующие системы. В качестве скорости может быть использовано время выполнения задачи в целом (в секундах, минутах и т.д.) [142] или время необходимое на тестирование и обработку моделей;
- *Количество элементов.* Помимо этого, системы можно сравнить по количеству элементов в модели [142]. Например, количество поддерживаемых граней в 3D-модели.
- *Показатель сравнения расчетных возможностей.* Технические характеристики разных программных систем можно сравнить между собой, а также анализировать относительно расчетных возможностей ведущих программных комплексов, например, ANSYS [143–147]. Сравнения могут быть проведены в разрезе показателей геометрии, возможностей моделирования, в том числе моделирование материалов и др. [148]

Для технологий *управления жизненным циклом* помимо показателей, идентичных показателям оценки технологий цифрового проектирования и моделирования, могут быть использованы показатели, связанные с хранением и управлением данными, а также управлением изменениями. Например, для PDM-систем могут быть использованы показатели оценки уровня безопасности хранения и управления данными о продукции [149]. Также может быть оценено наличие интеграции с другими системами (например, ERP, CRM, MES) [150], удобство интерфейса и поддержка облачных решений.

*Новые материалы* могут быть оценены в зависимости от наличия или отсутствия у материалов таких технических характеристик, как термическая стойкость и стойкость к УФ-излучению, огнестойкость, химическая стабильность, устойчивость к электромагнитным помехам, рассеивание электростатического заряда, прочность и ударопрочность материала, вес, теплопроводимость и другие [35].

Бенчмарки показателей технологий «умного» производства могут отражать различные характеристики высокотехнологичного производственного оборудования и обеспечивающих их деятельность технологий (роботы, аддитивные технологии, технологии беспроводной связи и промышленного интернета). Например, для оценки промышленных роботов могут быть использованы показатели *точности, скорости* (например, градусы, пройденные в секунду, для определения скорости работы каждой оси робота) и *диапазона движения робота*, а также совершенные ошибки [151].



Помимо этого, может быть использована метрика *повторяемости*, то есть способности робота возвращаться в одно и то же положение снова и снова. Например, FANUC M20ia имеет повторяемость  $\pm 0,08$  мм, то есть его рука будет попадать в ту же зону в пределах 0,08 мм от запрограммированного положения при каждом выполнении цикла [151]. Другим показателем для оценки роботов является *количество степеней свободы*, определяемое числом осей у робота. Количество степеней свободы напрямую влияет на гибкость и способность робота выполнять сложные задачи.

*Грузоподъемность* является еще одним показателем оценки промышленных роботов, который может играть важную роль в зависимости от назначения робота. Она представляет собой максимальный вес, который может выдержать манипулятор робота, и обычно выражается в килограммах. Грузоподъемность сильно различается среди промышленных роботов, показатели варьируются от 0,5 кг до более 1000 кг [151]. Для некоторых задач может быть важна масса робота, например, если он будет установлен над головой. Важно отметить, что существуют отраслевые стандарты и критерии для промышленных роботов, по которым они могут быть оценены. Эти стандарты устанавливаются такими организациями, как Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO) и Ассоциация робототехники (Robotic Industries Association, RIA) [152].

**Финансово-рыночные показатели** играют ключевую роль в оценке экономической ценности и рыночного потенциала технологий и могут быть применимы для всех сегментов рынка «Технет». Финансово-рыночные показатели позволяют сравнить между собой сегменты рынка, технологии сегментов и компании сегментов рынка. Благодаря этим показателям могут быть выявлены лидирующие направления рынка «Технет», проанализированы перспективы роста для каждого направления, а также определены лидирующие игроки на рынке. Также эти показатели могут быть индикаторами конкурентоспособности на мировом и региональных рынках.

Чаще всего эти бенчмарки измеряются в денежном эквиваленте (например, в млрд долл.). Эти бенчмарки основаны на показателях, как правило, оцениваемых в рыночных отчетах маркетинговых и консалтинговых компаний, таких как Global Market Insights, MarketsandMarkets, The Insight Partners, Fortune Business Insights, Precedence Research, Market.U.S, Next Move Strategy Consulting, Introspective Market Research, IMARC, Future Market Insights, Maximize Market Research и другие.

В качестве показателей могут быть использованы следующие бенчмарки:

- *Емкость рынка.* Этот показатель может учитывать как текущие значения, так и прогнозные, а также быть оценен как в целом по сегменту, так и по конкретным технологиям сегмента;
- *Среднегодовой темп роста (Compound annual growth rate, CAGR).* Этот показатель отражает динамику и направление развития рынка;
- *Выручка компаний.* Этот показатель позволяет определить ключевых игроков и конкурентов на рынке, степень их консолидации и масштабы охвата рынка;
- *Уровень расходов компаний и конечных пользователей на технологии.* Данный показатель позволяет сравнить, какие технологии пользуются большим спросом в текущий момент времени и какие технологии будут востребованным в ближайшем будущем. Например, аналитические и консалтинговые компании приводят сравнение расходов на облачные сервисы в мире за разные периоды [153];

- *Инвестиции.* Инвестиции в проекты, научные исследования и новые разработки, а также стартапы могут продемонстрировать, какие технологии и направления считаются перспективными. Внедрение технологий «умного» производства в том числе сопровождается выделением инвестиций со стороны государства на приобретение технологий и продукции, например, Международная федерация робототехники (International Federation of Robotics, IFR) приводит обзор стратегий государственных инвестиций в исследования и разработки в области робототехники в странах Азии, Европы, а также Северной Америки [154].

**Показатели внедрения и использования технологий** демонстрируют уровень их практического применения в различных отраслях, регионах и компаниях. Эта группа показателей позволяет оценить интеграцию технологий в производственные процессы, уровень распространения технологий и темпы их внедрения. С помощью этих показателей можно оценить уровень развития рынка, определить, какие регионы, отрасли или компании лидируют в применении технологий, а также оценить перспективность и потенциал технологий. К важным бенчмаркам показателей внедрения и использования технологий относятся:

- *Плотность применения технологий, то есть количество установленного оборудования на определенное количество сотрудников.* Например, по данным Международной федерации робототехники плотность роботов оценивается по количеству установленных роботов на 10 000 сотрудников или на 1 000 специалистов в различных странах [125];
- *Количество установленного оборудования в год.* Международная федерация робототехники использует метрики количества установок в год, а также количества установок на текущий период накопительным итогом для оценки внедрения промышленных роботов. Количество установок может быть оценено по отраслям и регионам [155]. Также этот показатель использован в отчете Wohlers, где проанализировано количество установленного оборудования промышленных аддитивных технологий по странам [156];
- *Объем производства.* Например, для уровня развития новых материалов может быть использован показатель оценки объема производства материалов в мире по типам материалов или связующих компонентов в натуральном выражении за определенный временной промежуток [157]. Для аддитивных технологий показателем может быть количество проданных 3D-принтеров, которое приводится в отчете Wohlers [156];
- *Объем продукции, выпущенный с применением технологий.* Например, благодаря использованию специализированных манипуляторов в технопарке «Русклимат ИКСЭл» объем производства электрических конвекторов удалось увеличить до 145 тыс. единиц в месяц [158];
- *Степень распространения технологий среди компаний, в том числе в рамках регионального и отраслевого применения.* Этот показатель может включать количество компаний, которые используют технологии, например, технологии цифрового проектирования и моделирования [89].

Таким образом, бенчмарки показателей технологических сегментов направления «Технет» НТИ могут быть поделены на технические характеристики, финансово-рыночные показатели и показатели внедрения и использования технологий. Такое деление учитывает функциональные возможности, экономическое значение и уровень распространения технологий рассматриваемых технологических сегментов, что позволяет понять текущее состояние и перспективы развития технологий.

## ГЛОССАРИЙ ТЕРМИНОВ НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ

### А

**Автоматизированная система** – система, состоящая из комплекса средств автоматизации, реализующего информационную технологию выполнения установленных функций, и персонала, обеспечивающего его функционирование.

Источник: ГОСТ Р 59853–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [159]

**Аддитивное производство (Additive Manufacturing)** – создание физического объекта по закодированному в цифровом виде проекту путем нанесения материала с помощью процесса 3D-печати.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Gartner Information Technology Glossary [160]

### Б

**Большие данные (Big Data, BD)** –

1. наборы данных, объем которых превышает возможности по сбору, хранению, управлению и анализу, имеющиеся у типичного программного обеспечения для работы с базами данных<sup>3</sup>;
2. совокупность технологий, которые призваны:
  - а) обрабатывать большие по сравнению со «стандартными» сценариями объемы данных;
  - б) уметь работать с быстро и постоянно поступающими данными в очень больших объемах;
  - в) уметь работать со структурированными и плохо структурированными данными параллельно в разных аспектах.

Источник: ПостНаука, статья «Что такое Big Data», 2022 [161]

**Большие данные (Big Data, BD)** – массивы информации, характеризующиеся колоссальными объемами, стремительно растущей скоростью накопления данных, разнообразием их формата представления (как структурированная, так и не структурированная информация); а также комплекс, инновационных методов и способов их хранения и обработки с целью автоматизации, оптимизации бизнес-процессов, а также обеспечения принятия наиболее эффективных решений на основе накопленной информации.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Gartner IT Glossary [162]

---

<sup>3</sup> Объем данных как критерий включения в состав Big Data является чрезвычайно субъективной категорией и может варьироваться в зависимости от степени технологического развития или вида экономической деятельности.

## Ж

**Жизненный цикл (life cycle)** – процесс развития объекта (системы) от зарождения идеи до вывода из эксплуатации. Жизненный цикл некоторых систем может иметь периодический характер.

Примечание – В зависимости от точки зрения участник жизненного цикла объекта видит свое множество состояний, объединенных в стадии.

Источник: ГОСТ Р 57269–2016 Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред. Термины и определения [163]

**Жизненный цикл изделия, жизненный цикл (life cycle)** – совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от ее замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации.

Источник: ГОСТ Р 56136–2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения [164]

## И

**Изделие** – предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (на предприятии) по конструкторской документации.

Примечания:

3. Изделиями могут быть: устройства, средства, машины, агрегаты, аппараты, приспособления, оборудование, установки, инструменты, механизмы, системы и др.
4. Число изделий гложет измеряться в штуках (экземплярах).
5. К изделиям допускается относить завершенные и незавершенные предметы производства, в том числе заготовки.

Источник: ГОСТ 2.101–2016 Единая система конструкторской документации. Виды изделий [165]

**Индустриальный интернет, промышленный интернет (Industrial Internet, Industrial Internet of Things, IIoT, I2oT)** – интеграция в состав сложного промышленного оборудования датчиков и программного обеспечения, объединенных в сеть. Подразумевается наличие «сети физических объектов, в которые встроена технология, позволяющая им коммуницировать, фиксировать показатели и обмениваться данными по внутренним и внешним каналам».

Источники: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [166; 167]

**Индустриальный Интернет, промышленный Интернет (Industrial Internet, Industrial Internet of Things, IIoT, I2oT)** – система объединенных компьютерных сетей и подключенных промышленных (производственных) объектов со встроенными датчиками и программным обеспечением для сбора и обмена данными, с возможностью удаленного контроля и управления в автоматизированном режиме, без участия человека.

Источник: Группа компаний «СиСофт» (CSoft) [168]

**Интернет вещей (Internet of Things, IoT)** – это инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на нее.

Источник: ПНСТ 518–2021 (ИСО/МЭК 20924:2018) Информационные технологии (ИТ).  
Интернет вещей. Термины и определения [169]

**Интернет вещей (Internet of Things, IoT)** – это система взаимосвязанных вычислительных устройств, которые могут собирать и передавать данные по беспроводной сети без участия человека. Система интернета вещей включает в себя датчики и устройства, взаимодействие которых осуществляется через облачное соединение. Как только данные попадают в облако, осуществляется их обработка программными средствами и принимается решение о необходимости выполнения определенных действий, например настройки датчиков и устройств без необходимости ввода данных пользователем или отправки уведомлений. Полная система интернета вещей состоит из четырех отдельных компонентов: датчики устройств, средства подключения, инструменты обработки данных и пользовательский интерфейс.

Источник: Лаборатория Касперского [170]

**Искусственный интеллект (artificial intelligence)** – комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Источник: ГОСТ Р 59277–2020 Системы искусственного интеллекта.  
Классификация систем искусственного интеллекта [171]

## К

**Компьютерное проектирование (Computer-Aided Design, CAD)** – процесс разработки 3D-моделей в CAD-системах. CAD-системы – это программные системы компьютерного проектирования, позволяющие на основе 3D-моделей осуществлять создание чертежей и / или оформление конструкторской и / или технологической документации.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

**Компьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE)** – совокупность методов и средств решения научно-технических проблем путем математического и компьютерного моделирования на основе CAE-систем. CAE-системы – программные системы компьютерного инжиниринга, позволяющие на основе математических моделей разных классов и уровней сложности (в самых общих случаях описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных) исследовать поведение материалов, физико-механических и технологических процессов, машин и конструкций.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

## М

**Моделирование** – изучение свойств и/или поведения объекта моделирования, выполненное с использованием его моделей.

Источник: ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения [172]

**Моделирование технологических процессов аддитивного производства (Computer-Aided Additive Manufacturing, CAAM)** – процесс обработки, исправления геометрии и подготовки 3D-моделей, полученных из CAD/CAE-систем, для аддитивного производства при помощи специализированных программных систем.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

**Модель (model)** – сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира.

Источник: ГОСТ Р 57188–2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения [173]

**Модель (model)** – упрощенная объект-система, описывающая основные характеристики более сложной системы (реального объекта, процесса, явления).

Источник: ГОСТ Р 57269–2016 Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред. Термины и определения [163]

**Модель (model)** – совокупность семантических и графических символов связей и отношений между ними, адекватно (согласно уровню, глубине и точности представления) описывающая некоторую рассматриваемую предметную область.

Источник: ГОСТ Р 57700.3–2017 Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Термины и определения [174]

**Модель (изделия)** – сущность, воспроизводящая свойства реального изделия.

Источник: ГОСТ 2.052–2021 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения [175]

## Н

**Новые материалы (advanced materials)** – материалы, которые обладают высокими эксплуатационными характеристиками с точки зрения функциональных или физических свойств по сравнению с обычными материалами. Новые материалы разработаны с использованием инженерных технологий и специализированных методов синтеза. К таким материалам относятся биоматериалы, наноматериалы, керамика, высококачественные металлы, композиты и др. Под высокими эксплуатационными характеристиками понимаются: высокая прочность, затвердевание, коррозионная стойкость, долговечность, эффект памяти формы, специфическая реакция при воздействии определенной среды или раздражителей, высокая эффективность при больших нагрузках и др.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Kemet [176]

## П

**Передовые технологии компьютерного проектирования и моделирования и технологии оптимизации** – совокупность технологий компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD), математического моделирования, компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE, и High Performance Computing, HPC) и оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO) – многопараметрической, многокритериальной, многодисциплинарной, топологической, топографической, оптимизации размеров и формы и т. д.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

**Передовые производственные технологии (ППТ)** – совокупность новых, с высоким потенциалом, уже зарекомендовавших себя, демонстрирующих де-факто стремительное развитие, но имеющих пока по сравнению с традиционными технологиями относительно небольшое распространение, материалов, методов и процессов, которые используются для производства глобально конкурентоспособных и востребованных на мировом рынке продуктов или изделий (машин, конструкций, агрегатов, приборов, установок и т. д.).

Передовые производственные технологии включают:

- цифровое проектирование и моделирование как совокупность технологий компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD); математического моделирования, компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE, и High Performance Computing, HPC) и оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO); разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ (Computer-Aided Manufacturing, CAM) и моделирования технологических процессов аддитивного производства (Computer-Aided Additive Manufacturing, CAAM); бионического дизайна ((Simulation & Optimization)-Driven Bionic Design); «умных» моделей; цифровых двойников (Digital Twin); технологий управления данными об изделии (Product Data Management, PDM) и технологий управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM);
- новые материалы (в первую очередь, композиционные материалы, метаматериалы, металлопорошки для аддитивного производства);
- аддитивные технологии, включая 3D-принтеры, технологии, подходы и способы работ с исходными материалами, разработка и эксплуатация расходных материалов и набор услуг по 3D-печати;
- CNC-технологии и гибридные технологии, включая станки и технологии оборудования с числовым программным управлением, приводную технику, гибридные многофункциональные технологии обработки;
- промышленная сенсорика – внедрение «умных» сенсоров и инструментов управления (контроллеров) в производственное оборудование, в помещение на уровне цеха или фабрики в целом;
- технологии робототехники, прежде всего, гибкие производственные ячейки;
- информационные системы управления предприятием (Industrial Control System – ICS, Manufacturing Execution System – MES, Enterprise Resource Planning – ERP, Enterprise Application Software – EAS);



- Big Data – генерация, сбор, хранение, управление, обработка и передача больших данных, в первую очередь, «умных» больших данных (Smart Big Data);
- индустриальный Интернет;
- технологии виртуальной и дополненной реальности;
- экспертные интеллектуальные системы и искусственный интеллект.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

**Передовые производственные технологии (ППТ)** – сложный комплекс мультидисциплинарных знаний, наукоемких технологий и системы интеллектуальных ноухау, полученных с помощью длительных и дорогостоящих научных исследований, эффективного применения концепции открытых инноваций и трансфера передовых наукоемких технологий.

Многие наукоемкие технологии аккумулируют наработки нескольких лет, создаются большими коллективами, а потому трудоемкость их создания составляет тысячи и десятки тысяч человеко-лет.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

**Программное обеспечение компьютерного моделирования, ПО КМ** – программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы.

Примечание – Программное обеспечение компьютерного моделирования позволяет моделировать различные объекты моделирования в соответствии с классификацией (ГОСТ Р 57412 и ГОСТ Р 57700.22), а также содержит в своем составе программные средства для реализации различных сервисных (по отношению к компьютерной модели) функций.

Примеры: препроцессор и постпроцессор (по ГОСТ Р 57700.10), программные модули импорта и экспорта моделей, визуализации геометрических моделей, результатов моделирования, цифровых (виртуальных) испытаний, программы составления схем и сценариев [ГОСТ Р 57700.37–2021].

Источник: ГОСТ Р 57700.2–2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий.  
Сертификация программного обеспечения. Общие положения [177]

**Программно-технологическая платформа цифровых двойников** – цифровая платформа, в которой вычислительные аппаратные средства интегрируются с разными типами программного обеспечения компьютерного моделирования (ПО КМ), программными решениями компьютерного проектирования и моделирования, генерации, сбора, обработки и передачи данных, визуализации, а также обеспечения эффективного взаимодействия участников процесса создания цифровых двойников изделий.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

## Р

**Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ (Computer-Aided Manufacturing, CAM)** – процесс проектирования обработки изделий на оборудовании с ЧПУ (фрезерных, сверлильных, токарных, шлифовальных, эрозионных, пробивных и других станках) при помощи САМ-систем. САМ-системы – программные системы, позволяющие на основе 3D-моделей, полученных из САД-систем, осуществлять разработку управляющих программ для изготовления изделий на оборудовании с ЧПУ.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

**Робототехника** – наука и практика проектирования, производства и применения роботов – запрограммированных автономных механизмов, предназначенных для выполнения разного рода работ.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам The International Organization for Standardization [178]

## С

**Сенсор (sensor)** – устройство для обнаружения событий или изменений в окружающей среде и передачи информации на другие электронные устройства.

Источник: ГОСТ Р ИСО/МЭК 18038–2023 Информационные технологии.

Компьютерная графика, обработка изображений и представление данных об окружающей среде.

Представление сенсоров в смешанной и дополненной реальности [179]

**Система управления процессами и данными компьютерного моделирования (Simulation Process and Data Management, SPDM)** – среда/платформа, которая позволяет эффективно управлять конфигурацией данных моделирования, оптимизировать процессы, осуществлять совместную работу глобально распределенных команд, обеспечивать прослеживаемость и принимать решения по оптимизации продукта/изделия.

Такие системы связывают входные и выходные данные программ препроцессинга, систем конечно-элементного анализа и программ обработки результатов вычислений (постпроцессинга), повышая степень автоматизации, обеспечивая прослеживаемость расчетных вариантов и улучшая процесс моделирования.

SPDM-системы позволяют обеспечить прозрачность и контролируемость процесса разработки, принятие обоснованных решений; упрощают работу с расчетными вариантами и конечно-элементным моделированием, а также с формированием отчетов.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [180; 181]

**«Сквозные» цифровые технологии** – ключевые направления программы поддержки развития перспективных отраслей, определенные распоряжением Правительства РФ 1632-р от 27 июля 2017 г. «Цифровая экономика Российской Федерации». К ним относятся большие данные, нейротехнологии и искусственный интеллект, системы распределенного реестра, квантовые технологии, новые производственные технологии, промышленный интернет, компоненты робототехники и сенсорики, технологии беспроводной связи, технологии виртуальной и дополненной реальности.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Распоряжения Правительства РФ 1632-р, 2017 [182]

**Стадия жизненного цикла (life cycle stage)** – часть жизненного цикла, выделяемая по признакам характерных для нее явлений, процессов (работ) и конечных результатов.

Источник: ГОСТ Р 56136–2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения [164]

**Суперкомпьютерный инжиниринг (High Performance Computing, HPC)** – совокупность методов и средств решения научно-технических проблем путем математического и суперкомпьютерного моделирования на основе CAE-систем и высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров, кластеров и т. д., построенных, как правило, на эффективном сочетании CPU- и GPU-процессоров), позволяющих эффективно реализовать подход одновременного / параллельного решения нескольких вариантов задач или разных задач из разных отраслей промышленности.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

## Т

**Технологии управления данными об изделии (Product Data Management, PDM)** – решения и методики, используемые внутри компании 1) для организации, обеспечения доступа и управления данными, которые имеют отношение к изделиям; 2) для управления жизненным циклом этих изделий.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам CIMdata's PLM Glossary [183]

**Технологии управления данными об изделии (Product Data Management, PDM)** – организационно-техническая система, обеспечивающая управление всей информацией об изделии. При этом в качестве изделий могут рассматриваться различные сложные технические объекты (корабли и автомобили, самолеты и ракеты, компьютерные сети и др.). PDM-системы являются неотъемлемой частью PLM-систем. Одной из целей PDM-систем является обеспечение возможности групповой работы над проектом, то есть просмотра в реальном времени и совместного использования общих информационных ресурсов предприятия.

Источник: Группа компаний «СиСофт» (CSoft) [184]

**Технологии управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM)** – стратегический подход к ведению бизнеса, который использует набор технических решений для поддержки совместного (collaborative) создания, управления, распространения и использования описания изделия (product definition information) в среде расширенного (extended) предприятия и который охватывает жизненный цикл изделия от стадии концепта до утилизации, – при интеграции людских ресурсов, процессов и информации.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам CIMdata's PLM Glossary [185]

## Ц

**Цифровая модель изделия** – система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.

Примечания:

1. Цифровая модель создается с использованием программного обеспечения компьютерного моделирования и (или) инструментальных программных и иных средств.
2. Цифровая модель должна описывать структуру, функциональность и поведение разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на тех стадиях жизненного цикла (ЖЦ), которые установлены в соответствующих технических заданиях.
3. Наполнение и функциональность цифровой модели зависит от стадии ЖЦ изделия.
4. Оценка соответствия цифровой модели изделия в общем случае включает в себя процедуры верификации и валидации математических моделей по ГОСТ Р 57188, компьютерных моделей и программного обеспечения компьютерного моделирования по ГОСТ Р 57700.1, ГОСТ Р 57700.2, ГОСТ Р 57700.24, ГОСТ Р 57700.25.
5. Под электронными документами понимаются электронные документы по ГОСТ 2.001, ГОСТ 3.1001, ГОСТ 3.1102, ГОСТ 19.101, ГОСТ 34.601, ГОСТ Р 58301.

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.  
Цифровые двойники изделий. Общие положения [186]

**Цифровая трансформация** – проявление качественных, революционных изменений, заключающихся не только в отдельных цифровых преобразованиях, но и в принципиальном изменении структуры экономики, в переносе центров создания добавленной стоимости в сферу выстраивания цифровых ресурсов и сквозных цифровых процессов.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам World Bank Group,  
Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 2021 [187]

**Цифровое проектирование и моделирование (Smart Design)** – технологии, обеспечивающие реализацию концепции передового цифрового проектирования; драйвером этого процесса выступает технология разработки цифрового двойника на основе создания и применения многоуровневой системы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, на основе математических моделей разных классов, уровней сложности и адекватности (в самых общих случаях описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных), на основе проведения цифровых (виртуальных) испытаний, применения цифровых (виртуальных) испытательных стендов и цифровых (виртуальных) испытательных полигонов.

Источник: Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии  
«Новые производственные технологии», 2019 [188]

**Цифровой (виртуальный) испытательный полигон** – система, в общем случае состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения полигонных испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) объекта испытаний.

Примечание – Цифровая модель для проведения полигонных испытаний должна обеспечивать испытания объекта в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта.

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.  
Цифровые двойники изделий. Общие положения [186]

**Цифровой (виртуальный) испытательный стенд** – система, в общем случае состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения стендовых испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) объекта испытаний.

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.  
Цифровые двойники изделий. Общие положения [186]

**Цифровой двойник изделия** – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями.

Примечания:

1. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия.
2. При создании и применении цифрового двойника изделия участникам процессов жизненного цикла (по ГОСТ Р 56135) рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников.

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.  
Цифровые двойники изделий. Общие положения [186]

**ЦД-Р** – цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии разработки изделия.

**ЦД-П** – цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии производства изделия.

**ЦД-Э** – цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии эксплуатации изделия.

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.  
Цифровые двойники изделий. Общие положения [186]

**Цифровые (виртуальные) испытания** – определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта.

Примечания:

1. В настоящем стандарте под объектом испытания подразумевается изделие.
2. В зависимости от вида цифровых (виртуальных) испытаний может быть использован как сам объект испытаний, так и его составные части.
3. Для проведения цифровых (виртуальных) испытаний рекомендуется использовать программно-технологические платформы видов испытаний, определенных ГОСТ 16504.

Источник: ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.  
Цифровые двойники изделий. Общие положения [186]

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 года № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». – URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/73986> (дата обращения: 08.11.2024)
2. Drechsel J. Cooperation in Supply Chains // Cooperative Lot Sizing Games in Supply Chains : Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems : Т. 644. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. – ISBN 978-3-642-13724-2. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-13725-9\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-13725-9_4) (дата обращения: 27.12.2024)
3. Фокина Д.А. Теоретические основы промышленной кооперации // Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : Т. 2. – Красноярск : 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-promyshlennoy-kooperatsii/viewer> (дата обращения: 27.12.2024)
4. Supply Chain Collaboration through Advanced Manufacturing Technologies // World Economic Forum. – URL: <https://www.weforum.org/publications/supply-chain-collaboration-through-advanced-manufacturing-technologies/> (дата обращения: 27.12.2024)
5. Orji I., Ojadi F. Assessing the effect of supply chain collaboration on the critical barriers to additive manufacturing implementation in supply chains // Journal of Engineering and Technology Management. – Vol. 68. – Article 101749. – ISSN 09234748. – DOI 10.1016/j.jengtecman.2023.101749. – URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092347482300019X> (дата обращения: 27.12.2024)
6. What are the 5 Levels of Automation? // Integration Controls – 1.10.2021. – URL: <https://integrated-controls.com/what-are-the-5-levels-of-automation/> (дата обращения: 10.12.2024)
7. Folgado F., Calderon D., Gonzáles I., Calderon A. Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends // Electronics. – 2024. – Issue 13 (4). – DOI <https://doi.org/10.3390/electronics13040782>. – URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/4/782> (дата обращения: 11.12.2024)
8. Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing System Architecture – 2018. – URL: <https://www.dke.de/resource/blob/1711304/2e4d62811e90ee7aad10eeb6fdeb33d2/alignment-report-for-reference-architectural-model-for-industrie-4-0-data.pdf> (дата обращения: 23.12.2024)
9. Zhang X., Ming X. Reference subsystems for Smart Manufacturing Collaborative System (SMCS) from multi-processes, multi-intersections and multi-operators // Enterprise Information Systems. – 15.03.2020. – Vol. 14. – Issue 3. – P. 282-307. – ISSN 1751-7575, 1751-7583. – DOI 10.1080/17517575.2019.1694705. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17517575.2019.1694705> (дата обращения: 23.12.2024)
10. План мероприятий («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы. – URL: <https://www.nti.one/documents/docs/ДК%20Технет.pdf> (дата обращения: 28.06.2023)
11. LM Wind Power – Customer Story // Dassault Systèmes. – URL: <https://www.3ds.com/insights/customer-stories/lm-wind-power> (дата обращения: 22.12.2024)

12. Joby Aviation: Air Taxi – Customer Story // Dassault Systèmes. – URL: <https://www.3ds.com/insights/customer-stories/joby-aviation-air-taxi> (дата обращения: 22.12.2024)
13. Dronamics cargo drone – Customer Story // Dassault Systèmes. – URL: <https://www.3ds.com/insights/customer-stories/dronamics-cargo-drone> (дата обращения: 22.12.2024)
14. CARBOMILL: high precision machining – Customer Story // Dassault Systèmes. – URL: <https://www.3ds.com/insights/customer-stories/carbomill-high-precision-machining> (дата обращения: 22.12.2024)
15. Accurately Models Acoustic Performance of Mining Equipment using ESI's VA One. – URL: <https://www.esi-group.com/customer-successes/epiroc-accurately-models-acoustic-performance-of-mining-equipment-using-esi-va-one> (дата обращения: 22.12.2024)
16. Моделирование раскатки на прессе для Уралмашзавод. – URL: <https://nova-e.org/projects/modelirovanie-raskatki-na-presse-dlya-uralmashzavod> (дата обращения: 21.12.2024)
17. Создание единой модели поезда – Single Core Model. – URL: <https://nova-e.org/projects/sozдание-edinoy-modeli-poezda-single-core-model> (дата обращения: 21.12.2024)
18. Fidesys – Истории успеха – Норильский никель. – URL: <https://cae-fidesys.com/success-story-nornikel> (дата обращения: 21.12.2024)
19. Fidesys – Истории успеха – Пензкомпрессормаш. – URL: <https://cae-fidesys.com/success-story-penzcompress> (дата обращения: 21.12.2024)
20. Уральский завод гражданской авиации (УЗГА) внедряет российский программный комплекс междисциплинарного моделирования FlowVision от компании ТЕСИС. – URL: <https://isicad.ru/ru/news.php?news=22719> (дата обращения: 21.12.2024)
21. Применение FlowVision. – URL: <https://flowvision.ru/ru/flowvision-applications> (дата обращения: 20.12.2024)
22. Области применения FlowVision. – URL: <https://flowvision.ru/ru/flowvision-applications/applications-review> (дата обращения: 20.12.2024)
23. Заказные работы – ТЕСИС. – URL: <https://tesis.com.ru/customworks/> (дата обращения: 20.12.2024)
24. Модульное платформенное решение для инженерного анализа и моделирования (CAE 2D, 3D) от Росатома. – URL: <https://digitalrosatom.ru/marketplace/logos> (дата обращения: 20.12.2024)
25. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 1 / А.И. Боровков, В.В. Бураков, Е.Р. Мартынец, Ю.А. Рябов, Л.А. Щербина // САПР и графика. – Вып. 8. – С. 42-51.
26. Боровков А.И., Бураков В.В. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 2 // САПР и графика. – 2023. – Вып. 9. – С. 54-64.
27. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 3 / А.И. Боровков, Е.Р. Мартынец, И.М. Мартынов, И.Ф. Шандер, Ю.Б. Житков, А.В. Волков, Ю.А. Горский // САПР и графика. – Вып. 10. – С. 50-62.
28. Боровков А.И., Ефимов-Сойни Н.К., Мартынец Е.Р., Рябов Ю.А. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 4 // САПР и графика. – 2024. – Вып. 5. – С. 4-12.



29. Боровков А.И., Чишко С.Д., Мартынец Е.Р., Рябов Ю.А. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 5 // САПР и графика. – 2024. – Вып. 7. – С. 4-16.
30. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников "Digital Twins" CML-Bench®. Часть 6 / А.И. Боровков, Д.С. Сачава, О. Князева, Е.Р. Мартынец, А.С. Алексахин, Ю.А. Рябов // САПР и графика. – 2024. – Вып. 8. – С. 12-24.
31. CML-Bench® – цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников. – URL: <https://cml-bench.ru/> (дата обращения: 01.12.2024)
32. Mercedes-Benz's Innovation Through JEC World's Startup Booster. – URL: <https://sesamers.com/materials/mercedes-benz-accelerates-innovation-with-composite-materials-at-jec-world/> (дата обращения: 16.12.2024)
33. Mercedes-Benz, UBQ Materials Win Automotive Sustainability Award – UBQ Materials. – URL: <https://www.ubqmaterials.com/news-events/mercedes-benz-ubq-materials-win-automotive-sustainability-award/> (дата обращения: 16.12.2024)
34. Tepex® thermoplastic composite-based door assembly receives U.S. Department of Energy Merit Award. – URL: <https://lanxess.com/en-US/Media/Press-Releases/2022/09/Tepex-thermoplastic-composite-based-door-assembly-receives-US-Department-of-Energy-Merit-Award> (дата обращения: 13.12.2024)
35. Перспективы и сценарии развития новых материалов в рамках направления «Технет» НТИ в 2023 году. Экспертно-аналитический доклад : монография / А. И. Боровков, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин, Н. И. Прытков, А. М. Трапезникова, О. В. Толочко, И. А. Кобыхно, Е. В. Бобрынина; ред. А. И. Боровков. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 184 с. – URL: <https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/06/28/otchety/perspectivy-i-scenarii-razv-materialov.pdf> (дата обращения: 21.11.2024)
36. The largest thermoplastic aerostructures successfully manufactured as part of the Multi-Functional Fuselage Demonstrator project – JEC. – URL: <https://www.jeccomposites.com/news/by-jec/best-of-2023-the-largest-thermoplastic-aerostructures-successfully-manufactured-as-part-of-the-multi-functional-fuselage-demonstrator-project/> (дата обращения: 11.12.2024)
37. GKN Fokker delivers 8m x 4m composite aerostructure – Aerospace Manufacturing and Design. – URL: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/news/gkn-fokker-delivers-8m-4m-composite-aerostructure/> (дата обращения: 11.12.2024)
38. DLR MFFD – Production Technology for the Thermoplastic Fuselage of Tomorrow. – URL: <https://www.dlr.de/en/bt/research-transfer/projects/project-archive/mffd> (дата обращения: 11.12.2024)
39. MFFD – Production Technology for the Thermoplastic Fuselage of Tomorrow – YouTube. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Jf9cd7V2bLA> (дата обращения: 11.12.2024)
40. Инженеры Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» впервые в России создали промышленную технологию производства композита из непрерывного углеволокна для 3D-печати // Fea.ru. – URL: [//fea.ru/news/8787](https://fea.ru/news/8787) (дата обращения: 04.04.2024)
41. Инженеры СПбПУ впервые в России создали промышленную технологию производства композита из непрерывного углеволокна для авиационной отрасли // АвиаПорт.Новости. – URL: <https://www.aviaport.ru/news/inzhenery-spbpu-vpervye-v-rossii-sozdali-promyshlennuyu-tekhnologiyu-proizvodstva-kompozita-iz-nepre/> (дата обращения: 13.12.2024)

42. Россия еще на шаг стала ближе к технологическому суверенитету: ученые разработали супер-прочный материал для строительства ракет. – URL: <https://www.pravda.ru/news/science/1987587-prochnyi-material/> (дата обращения: 13.12.2024)
43. Зачем «Росатому» уникальный филамент для 3D-печати. – URL: <https://strana-rosatom.ru/2024/05/27/zachem-rosatomu-unikalnyj-filamen/> (дата обращения: 13.12.2024)
44. Росатом и СПбПУ осваивают производство филаментов с армированием непрерывным углеволокном. – URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rosatom-i-spbpu-osvaivayut-proizvodstvo-filamentov-s-armirovaniem-nepreryvnyim-uglevoloknom> (дата обращения: 13.12.2024)
45. Двигатель ПД-35: большая тяга к небу. ОДК // Ростех. – URL: <https://rostec.ru/innovations/projects/dvigatel-pd-35-bolshaya-tyaga-k-nebu/> (дата обращения: 13.12.2024)
46. Двигатель ПД-35. ОДК. – URL: <https://www.uecrus.com/products-and-services/products/grazhdanskaya-i-transportnaya-aviatsiya/dvigatel-pd-35/> (дата обращения: 13.12.2024)
47. ОДК разработала композитную лопатку для авиадвигателя ПД-35. – URL: <https://rostec.ru/news/odk-razrabotala-kompozitnuyu-lopatku-dlya-aviadvigatelya-pd-35/> (дата обращения: 13.12.2024)
48. ОДК: двигатели ПД-35 будут использовать детали из композитных материалов – Hi-Tech – Селдон Новости. – URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/244253273> (дата обращения: 13.12.2024)
49. Генконструктор назвал стоимость создания двигателя ПД-35 – РИА Новости. – URL: <https://ria.ru/20190809/1557340530.html> (дата обращения: 13.12.2024)
50. Создание новейшего российского авиадвигателя перенесли: Lenta.ru. – URL: <https://lenta.ru/news/2023/10/13/pd/> (дата обращения: 13.12.2024)
51. ОДК создает из композитов детали для двигателя ПД-35. – URL: <https://rostec.ru/news/odk-sozdaet-iz-kompozitov-detali-dlya-dvigatelya-pd-35/> (дата обращения: 13.12.2024)
52. ОДК создает детали для двигателя ПД-35 из композитов. – URL: <https://www.uecrus.com/press/696508/> (дата обращения: 13.12.2024)
53. Тренды и сценарии развития рынка авиационных двигателей, включая двигатели беспилотных летательных аппаратов, в 2023 году. Экспертно-аналитический доклад : монография / А. И. Боровков, Е. Р. Мартынец, Л. А. Щербина, Н. И. Прытков, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин; ред. А. И. Боровков. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 204 с. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/01/29/2023\\_1229\\_ЭАД.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/01/29/2023_1229_ЭАД.pdf) (дата обращения: 21.11.2024)
54. Сделано в России: представлен первый в мире робот для сварки в атомных реакторах. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/09/21/sdelano-v-rossii-predstavlen-pervyj-v-mire-robot-dlja-svarki-v-atomnyh-reaktorah.html> (дата обращения: 16.12.2024)
55. How ABB robots are helping Renault's EV transition – News center. – URL: <https://new.abb.com/news/detail/114846/how-abb-robots-are-helping-renaults-ev-transition> (дата обращения: 19.12.2024)
56. 3D printing in shipbuilding: MAMBO is a worldwide innovation – KUKA AG. – URL: <https://www.kuka.com/en-de/company/press/news/2020/11/mambo-kuka-robots-are-revolutionizing-shipbuilding> (дата обращения: 19.12.2024)

57. KUKA and Webasto revolutionize battery production – KUKA AG. – URL: <https://www.kuka.com/en-de/company/press/news/2021/04/kuka-und-webasto-revolutionieren-die-batteriefertigung> (дата обращения: 19.12.2024)
58. Kawasaki-Политех. – URL: <https://kawasakirobot.ru/kawasaki-polytech> (дата обращения: 12.11.2024)
59. «Kawasaki-Политех»: технологии, которые изменят мир. – URL: <https://www.spbstu.ru/media/smi/partnership/kawasaki-polytech-technologies-change-world/> (дата обращения: 31.10.2024)
60. New technologies in school education: KUKA robot cells at the Göppingen Vocational School // KUKA. – URL: [https://www.kuka.com/en-de/company/press/news/2022/11/kuka-ready2\\_educate-gs-goeppingen](https://www.kuka.com/en-de/company/press/news/2022/11/kuka-ready2_educate-gs-goeppingen) (дата обращения: 30.10.2024)
61. Nikon SLM Solution sells 900th metal 3D printer with Safran installing NXG XII 600 machine – TCT Magazine. – URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/metal-additive-manufacturing-news/nikon-slm-solution-sells-900th-metal-3d-printer-safran-nxg-xii-600/> (дата обращения: 23.12.2024)
62. BWT Alpine F1 Team purchases four 3D Systems SLA 750 3D printers to optimize wind tunnel testing – 3D Printing Industry. – URL: <https://3dprintingindustry.com/news/bwt-alpine-f1-team-purchases-four-3d-systems-sla-750-3d-printers-to-optimize-wind-tunnel-testing-221001> (дата обращения: 23.12.2024)
63. EOS to Launch High-Strength Aluminum Alloy – METALS WIRE. – URL: <https://metalswire.net/news-of-the-week/eos-to-launch-high-strength-aluminum-alloy/> (дата обращения: 23.12.2024)
64. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработал уникальные сплавы для аддитивных технологий // ВИАМ. – URL: <https://viam.ru/news/8534> (дата обращения: 13.12.2024)
65. Промышленный интернет вещей: рассказываем об успешных кейсах. – URL: [https://habr.com/ru/companies/kauri\\_iot/articles/471588/](https://habr.com/ru/companies/kauri_iot/articles/471588/) (дата обращения: 18.12.2024)
66. ОДК подключит около полутысячи станков к промышленному интернету вещей в 2024 году. – URL: <https://www.uecrus.com/press/odk-podklyuchit-okolo-polutysyachi-stankov-k-promyshlennomu-internetu-veshchey-v-2024-godu/> (дата обращения: 18.12.2024)
67. Индустриальный Интернет вещей (IIoT) в России и мире. Обзор состояния и перспективы развития. – URL: <https://1234g.ru/novosti/iiot-v-rossii-i-mire> (дата обращения: 18.12.2024)
68. The Edge AI Platform for Industrial IOT: OctaiPipe. – URL: <https://octaipipe.ai/solution/> (дата обращения: 17.12.2024)
69. OctaiPipe: Revolutionizing Critical Infrastructure Protection with AIoT – Deepgram. – URL: <https://deepgram.com/ai-apps/octaipipe> (дата обращения: 17.12.2024)
70. Industrial Internet of Things – IIoT (промышленный интернет вещей) в России. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/381216> (дата обращения: 17.12.2024)
71. Распоряжение Правительства РФ от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года». – URL: <http://government.ru/docs/48570/> (дата обращения: 24.12.2024)
72. Законопроект № 632206-8 "О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". – URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/632206-8> (дата обращения: 26.12.2024)

73. Импортозамещение оборудования для добычи нефти и газа обойдется в 20 млрд рублей / Тюменский технохаб – TNF. – URL: <https://oilgasforum.ru/news/tyumen-tech-hub/importozameshchenie-oborudovaniya-dlya-dobychi-nefti-i-gaza-oboedetsya-v-20-mlrd-rublej/> (дата обращения: 23.12.2024)
74. О производстве и использовании валового внутреннего продукта в 2023 году. – URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/52\\_05-04-2024.html](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/52_05-04-2024.html) (дата обращения: 23.12.2024)
75. Геофизические и гидродинамические исследования в горизонтальных и наклонных участках скважин – Инженерная практика. – URL: <https://glavteh.ru/геофизические-и-гидродинамические-и/> (дата обращения: 27.11.2024)
76. Трактор скважинный – Что такое Трактор скважинный? – Техническая Библиотека Neftegaz.RU. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/geologorazvedka-i-geologorazvedochnoe-oborudovanie/778395-traktor-skvazhinnyy/> (дата обращения: 27.11.2024)
77. TuffTRAC. – URL: [https://www.slb.ru/services/wireline/production\\_logging/conveyance/tufftrac/](https://www.slb.ru/services/wireline/production_logging/conveyance/tufftrac/) (дата обращения: 27.11.2024)
78. Запатентована уникальная технология проведения геофизических исследований в горизонтальных и наклонно-направленных скважинах. – URL: <https://www.pnsh.ru/zapatentovana-unikalnaya-tehnologiya-provedeniya-geofizicheskikh-issledovanij-v-gorizontalnyh-i-naklonno-napravlennyh-skvazhinah/> (дата обращения: 27.11.2024)
79. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М. : Машгиз, 1963. – 696 с. – URL: [https://rusneb.ru/catalog/010003\\_000061\\_80363a78ea1eedbeed4ca72058217d68/](https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_80363a78ea1eedbeed4ca72058217d68/) (дата обращения: 22.11.2024)
80. Исаев Ю.М. Расчет и конструирование аксиально-поршневых насосов: учебное пособие. – Ленинград : ЛПИ имени М. И. Калинина, 1979. – 98 с. – URL: <https://elibr.spbstu.ru/dl/2/si20-449.pdf/info> (дата обращения: 27.11.2024)
81. Универсальный механизм – FEA.RU // CompMechLab – разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/HPC. – URL: <https://fea.ru/article/universalnyj-mehanizm?ysclid=m554bjg3b0451867260> (дата обращения: 24.12.2024)
82. EULER.RU: Главная страница. – URL: <https://www.euler.ru/> (дата обращения: 27.11.2024)
83. Synopsys купит поставщика решений для инженерного анализа Ansys за \$35 млрд. – URL: <https://www.interfax.ru/world/940473> (дата обращения: 27.12.2024)
84. Synopsys получит одобрение ЕС на приобретение Ansys за \$35 млрд, сообщает Reuters. – URL: <https://ru.investing.com/news/stock-market-news/article-93CH-2608181> (дата обращения: 27.12.2024)
85. Новые возможности ANSYS 12.0 // Fea.ru. – URL: <https://fea.ru/news/5099> (дата обращения: 27.11.2024)
86. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, К. В. Кукушкин, А. А. Гамзикова; ред. А. И. Боровков. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/01/29/2023\\_1129\\_Монография\\_ЦД\\_в\\_высокотехнологичной\\_промышленности\\_Small.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/01/29/2023_1129_Монография_ЦД_в_высокотехнологичной_промышленности_Small.pdf) (дата обращения: 22.07.2024)
87. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения» – FEA.RU | CompMechLab – разработка и применение цифровых

- двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/HPC. – URL: <https://fea.ru/article/gost-c-d> (дата обращения: 27.11.2024)
88. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®. – URL: <https://cml-bench.ru> (дата обращения: 23.12.2024)
  89. Тренды и сценарии развития рынков, относящихся к "цифровой фабрике" по направлению "Технет" НТИ в условиях новой экономической реальности. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/06/30/ead\\_crim.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/06/30/ead_crim.pdf) (дата обращения: 23.12.2024)
  90. Перспективные технологии производства продукции : учебно-методическое пособие / Е.С. Синогоина, С.А. Ломовская, И.А. Екимова, В.А. Серяков, А.С. Федотов, Ю.П. Хмелевский, Р.Ю. Пак, Р.Р. Ахмеджанов – Томск : Издательство Томского государственного педагогического университета, 2020. – 152 с. – URL: <https://edu.study.tusur.ru/publications/9344/download> (дата обращения: 22.12.2024)
  91. Роботы в промышленности: преимущества и области применения. – URL: <https://www.alpha-intech.com/blog/robotechnical/rooty-v-promyshlennosti/> (дата обращения: 22.12.2024)
  92. План мероприятий («дорожная карта») «Технет 4.0» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы : Национальная технологическая инициатива. – Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ, 2020. – URL: [https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2021/06/24/2021\\_0624\\_DK\\_Technet.pdf](https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2021/06/24/2021_0624_DK_Technet.pdf) (дата обращения: 12.12.2024)
  93. Импортозамещение информационных технологий в промышленности // TAdviser. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/670543> (дата обращения: 23.12.2024)
  94. Рынок инженерного ПО в России будет расти на 16% ежегодно до 2030 года // Strategy Partners. – URL: <https://strategy.ru/news/rynok-inzhenernogo-po-v-rossii-budet-rasti-na-16-ezhegodno-do-2030-goda-315/> (дата обращения: 23.12.2024)
  95. Инженерное программное обеспечение (рынок России) // TAdviser. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/138596> (дата обращения: 23.12.2024)
  96. Рудник П.Б. Цифровая трансформация: ожидания и реальность: докл. к XXIII Ясинской (Апрельской) междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. – М. : Издательский дом Высшей школы экономики, 2022. – 221 с. – ISBN 978-5-7598- 2658-3 (в обл.), 978-5-7598-2468-8 (e-book). – URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/603838492.pdf> (дата обращения: 24.12.2024)
  97. Исследование потенциала импортозамещения программного обеспечения в приоритетных отраслях экономики / Е. Галиханова, М. Исаев, Ю. Крикунова, М. Образцова, Д. Шакирзянова – Иннополис : АНО ВО «Университет Иннополис», 2022. – 160 с.
  98. Половина проектировщиков в РФ вцепились в иностранный САПР // ComNews. – URL: <https://www.comnews.ru/content/226333/2023-05-25/2023-w21/polovina-proektirovschikov-rf-vcepilis-inostrannyyu-sapr> (дата обращения: 25.12.2024)
  99. Российский рынок прощается с зарубежным ПО и открывает возможности отечественным разработчикам // ЦИПР. – URL: <https://cipr.ru/> (дата обращения: 25.12.2024)
  100. Разработчики инженерного ПО против принудительного лицензирования аналогов // Телеспутник. – URL: <https://telesputnik.ru/materials/gov/news/razrabotchiki-inzhenernogo-po-protiv-prinuditelnogo-licenzirovaniya-analogov> (дата обращения: 25.12.2024)



101. Рынок инженерного ПО показал в России рост впервые за два года // CNews. – URL: [https://www.cnews.ru/news/top/2024-10-22\\_rynok\\_inzhenernogo\\_programmnogo](https://www.cnews.ru/news/top/2024-10-22_rynok_inzhenernogo_programmnogo) (дата обращения: 25.12.2024)
102. Призрак качества: компании в РФ используют иностранное ПО в 60% случаев // Известия. – URL: <https://iz.ru/1769041/elizaveta-krylova/prizrak-kachestva-kompanii-v-rf-ispolzuiut-inostrannoe-po-v-60-sluchaev> (дата обращения: 25.12.2024)
103. Каковы перспективы рынка инженерного ПО в России // RSpectr. – URL: <https://rspectr.com/infographics/perspektivy-inzhenernogo-po-rossii> (дата обращения: 25.12.2024)
104. От кризиса к росту: инженерное и инфраструктурное ПО в России // ИТ Медиа ИТ-рынок. – URL: <https://www.it-world.ru/it-news/p2wa4recaio448ks00ockw8ggcw84so.html> (дата обращения: 23.12.2024)
105. Утверждена «дорожная карта» по направлению «Новое промышленное программное обеспечение», реализуемая при координации Росатома // Ведомости. – URL: [https://www.vedomosti.ru/press\\_releases/2022/12/19/utverzhdena-dorozhnaya-karta-po-napravleniyu-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie-realizuemaya-pri-koordinatsii-rosatoma](https://www.vedomosti.ru/press_releases/2022/12/19/utverzhdena-dorozhnaya-karta-po-napravleniyu-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie-realizuemaya-pri-koordinatsii-rosatoma) (дата обращения: 15.12.2024)
106. Правительство перезапускает соглашения с крупнейшими компаниями о развитии отдельных высокотехнологичных направлений | Министерство экономического развития Российской Федерации. – URL: [https://www.economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo\\_perezapuskayet\\_soglasheniya\\_s\\_kрупнейshimi\\_kompaniyami\\_o\\_razvitii\\_otdelnyh\\_vysokotekhnologichnyh\\_napravleniy.html](https://www.economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo_perezapuskayet_soglasheniya_s_kрупнейshimi_kompaniyami_o_razvitii_otdelnyh_vysokotekhnologichnyh_napravleniy.html) (дата обращения: 15.12.2024)
107. Подписано обновленное Соглашение о намерениях между Правительством РФ, Росатомом и «Ростехом» // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – URL: [https://www.rosatom.ru/journalist/news/v-tselyakh-razvitiya-napravleniya-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie-podpisano-obnovlennoe/?sphrase\\_id=3634258](https://www.rosatom.ru/journalist/news/v-tselyakh-razvitiya-napravleniya-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie-podpisano-obnovlennoe/?sphrase_id=3634258) (дата обращения: 25.12.2024)
108. В Правительстве подписаны соглашения о сотрудничестве по «дорожным картам» высокотехнологичных направлений // Правительство Российской Федерации. – URL: <http://government.ru/news/47466/> (дата обращения: 25.12.2024)
109. Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий". – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202406180018?index=1> (дата обращения: 19.12.2024)
110. Анализ российского рынка композитных материалов: итоги 2023 г., прогноз до 2027 г. // РБК Магазин исследований. – URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14733/> (дата обращения: 25.12.2024)
111. Импортозамещение в полимерной отрасли: адаптация, инновации и перспективы роста // RUPEC. – URL: <https://rupec.ru/society/blogs/54298/> (дата обращения: 25.12.2024)
112. Композитное производство в России буксует из-за бюрократии. – URL: <https://dzen.ru/a/ZW1z0eH4LENF1KhL?ysclid=m4x4o2swe9695764674> (дата обращения: 25.12.2024)

113. Импортзамещение полимерного сырья: успехи и проблемы // Полимерные материалы. – URL: <https://polymerbranch.com/articles/importozameshhenie-polimernogo-syrya-uspehi-i-problemy/> (дата обращения: 25.12.2024)
114. Поворот в мышлении: как в России замещают импортные материалы для авиации и космоса. – URL: <https://habr.com/ru/articles/695148/> (дата обращения: 25.12.2024)
115. Мировой опыт и перспективы развития промышленного интернета вещей в России // Центр 2М. – URL: <https://center2m.ru/mirovoy-opyt-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 25.12.2024)
116. 3D-печать (аддитивные технологии) в России // TAdviser. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/671604> (дата обращения: 24.12.2024)
117. Аддитивные технологии: непрерывный рост // Новый атомный эксперт. – URL: [https://atomicexpertnew.ru/additive\\_continuous\\_growth](https://atomicexpertnew.ru/additive_continuous_growth) (дата обращения: 24.12.2024)
118. Аддитивные технологии в России: быстрая эволюция в 2022–2023 гг. // Индустрия3Д. – URL: <http://industry3d.ru/at-news/additivnye-tehnologii-v-rossii-bystraya-evolyuciya-v-2022-2023-gg/> (дата обращения: 24.12.2024)
119. Исследование российского рынка аддитивного производства. – URL: <https://polymerbranch.com/articles/issledovanie-rossijskogo-rynka-additivnogo-proizvodstva/> (дата обращения: 24.12.2024)
120. Расширяя границы: как 3D-печать развивает российскую промышленность // Forbes. – URL: <https://www.forbes.ru/spetsproekt/524935-rassiraa-granicy-kak-3d-pecat-razvivaet-rossijskuu-promyslennost?erid=F7NfYUJCUneP41TWLWop> (дата обращения: 24.12.2024)
121. На «Иннопроме-2024» обсудили перспективы развития аддитивных технологий в России // Интернет-портал СНГ. – URL: <https://e-cis.info/news/569/119639/> (дата обращения: 24.12.2024)
122. Одиннадцать роботов на 10 тыс. человек – Эксперт. – URL: <https://expert.ru/promishlennost/odinnadtsat-robotov-na-10-tys-chelovek/> (дата обращения: 25.12.2024)
123. Количество роботов на производстве в России кратно вырастет под контролем "Росатома". – URL: <https://www.comnews.ru/content/235860/2024-10-23/2024-w43/1007/kolichestvo-robotov-proizvodstve-rossii-kratno-vyrastet-pod-kontrolem-rosatoma> (дата обращения: 25.12.2024)
124. Робототехника (рынок России) // TAdviser.ru. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/519702> (дата обращения: 25.12.2024)
125. Global Robotics Race: Korea, Singapore and Germany in the Lead // International Federation of Robotics. – URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robotics-race-korea-singapore-and-germany-in-the-lead> (дата обращения: 03.10.2024)
126. Промышленная робототехника в России: выгода очевидна. – URL: <https://roboticsworld.ru/cases/promyshlennaya-robototekhnika-v-rossii-vygoda-ochevidna/> (дата обращения: 25.12.2024)
127. Федюнина А. А., Городный Н. А., Симачев Ю. В. Рынок промышленной робототехники в России под санкциями: в поиске драйверов спроса и предложения // ЭКО. – 2024. – Т. 54. – Вып. 2. – С. 91-107. – ISSN 0131-7652, 2686-7605. – DOI 10.30680/ECO0131-7652-2024-2-91-107. – URL: <https://publications.hse.ru/articles/publications.hse.ru/articles/870125254> (дата обращения: 25.12.2024)



128. Список крупнейших интеграторов промышленных роботов в России 2021 // TAdviser.ru. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/611572> (дата обращения: 25.12.2024)
129. Гурлев И. В. Цифровизация экономики России и проблемы роботизации // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – Вып. 4. – С. 1-12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-ekonomiki-rossii-i-problemy-robotizatsii> (дата обращения: 25.12.2024)
130. Роботы KUKA останутся в России – Импортзамещение: новые возможности. – URL: <https://www.comnews.ru/projects/import-substitution/news/231120/roboty-kuka-ostanutsya-rossii> (дата обращения: 25.12.2024)
131. Как российская робототехника переживает кризис и санкции?. – URL: <https://spark.ru/user/152684/blog/112968/kak-rossijskaya-robototekhnika-perezhivaet-krizis-i-sanktsii> (дата обращения: 08.11.2024)
132. «Войти в топ-25 стран по количеству промышленных роботов к 2030 году – для нас это очень амбициозная задача», интервью с Ольгой Мудровой, исполнительным директором НАУРР. – URL: <https://robotunion.ru/glavnaya/tpost/8ldvv2ki71-voiti-v-top-25-stran-po-kolichestvu-prom> (дата обращения: 25.12.2024)
133. Пока нулевыми темпами. Российским предприятиям нужно 100 000 роботов, а их 12 000. – URL: <https://mashnews.ru/poka-nulevyimi-tempami.-rossijskim-predpriyatiam-nuzhno-100-000-robotov-a-ix-12-000.html> (дата обращения: 25.12.2024)
134. Михаил Мишустин дал поручения по итогам стратегической сессии по национальному проекту «Средства производства и автоматизации». – URL: <http://government.ru/news/52141/> (дата обращения: 08.11.2024)
135. В Госдуме обсудили стратегические инициативы по развитию робототехники. – URL: <https://robot-control.ru/tpost/5asn89in91-v-gosdume-obsudili-strategicheskie-inits> (дата обращения: 25.12.2024)
136. Замглавы Минпромторга в интервью CNews: Внедрение роботов в автопроме окупается за 9 месяцев, на предприятии металлообработки – за 2 года // CNews.ru. – URL: [https://www.cnews.ru/articles/2024-02-26\\_zamglavy\\_minpromtorga\\_rf\\_v\\_intervyu](https://www.cnews.ru/articles/2024-02-26_zamglavy_minpromtorga_rf_v_intervyu) (дата обращения: 25.12.2024)
137. Рынок промышленных роботов в мире и России: демография диктует спрос // Росконгресс. – URL: <https://roscongress.org/materials/rynok-promyshlennykh-robotov-v-mire-i-rossii-demografiya-diktuet-spros/> (дата обращения: 25.12.2024)
138. Кузык М. Г., Симачев Ю. В. Стратегии адаптации российских компаний к санкциям 2022 г. // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2023. – Вып. 3(60). – С. 172-180. – ISSN 2221-2264. – URL: <https://publications.hse.ru/articles/publications.hse.ru/articles/857360605> (дата обращения: 25.12.2024)
139. Годовая выручка Promobot взлетела на 50% // TAdviser.ru. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/345446> (дата обращения: 25.12.2024)
140. «Промобот» запустил производство роботов-манипуляторов. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6693411> (дата обращения: 25.12.2024)
141. Руководство по точности измерений 3D-сканерами – SHINING 3D. – URL: <https://www.shining3d.ru/blog/tochnost-izmereniy-3d-skanerami/> (дата обращения: 26.12.2024)

142. Сравнение CAD-систем – ООО «ТеплоГенерация». – URL: <http://rosnaladka.ru/articles/65-sravnenie-cad-sistem.html> (дата обращения: 25.12.2024)
143. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа. Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на 2023 год): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 122 с.
144. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем автоматизированного проектирования (CAD-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 214 с.
145. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа (CAE-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 228 с.
146. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 174 с.
147. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем управления оборудованием с числовым программным управлением (CAM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 188 с.
148. Таблица возможностей ANSYS 2019 R3 – CAE Expert. – URL: <https://cae-expert.ru/brochures/tablica-vozmozhnostey-ansys-2019-r3> (дата обращения: 25.12.2024)
149. Kljajin M., Galeta T. Metrics for the PDM Functionality of ERP System // DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia. – 2004. – P. 859-864. – URL: <https://www.designsociety.org/publication/19848/METRICS+FOR+THE+PDM+FUNCTIONALITY+OF+ERP+SYSTEM> (дата обращения: 25.12.2024)
150. Product Data Management: Strategies, Tools & Best Practices. – URL: <https://www.accel-data.io/blog/product-data-management-key-strategies-tools-and-best-practices#> (дата обращения: 25.12.2024)
151. Robot Specifications. – URL: <https://robotsdoneright.com/Articles/robot-specifications.html> (дата обращения: 25.12.2024)
152. What Metrics Are Used For Evaluating Robot Performance? IndMALL. – URL: <https://www.indmall.in/faq/what-metrics-are-used-for-evaluating-robot-performance/> (дата обращения: 25.12.2024)
153. Белая книга цифровой экономики 2023. – URL: [https://files.data-economy.ru/Docs/White\\_paper\\_2023\\_.pdf](https://files.data-economy.ru/Docs/White_paper_2023_.pdf) (дата обращения: 21.11.2024)
154. Robotics Research: How Asia, Europe and America Invest – Global Report 2023 by IFR. – URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robotics-research-how-asia-europe-and-america-invest> (дата обращения: 25.12.2024)
155. World Robotics 2024 // International Federation of Robotics. – URL: [https://ifr.org/downloads/press2018/Press\\_Conference\\_2024.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/Press_Conference_2024.pdf) (дата обращения: 04.10.2024)
156. Wohlers Report 2022 Executive Summary. – URL: [https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/05/2022\\_ExSum.pdf](https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/05/2022_ExSum.pdf) (дата обращения: 25.12.2024)

157. Global thermoplastic production by type 2050 – Statista. – URL: <https://www.statista.com/statistics/1192886/thermoplastics-production-volume-by-type-globally/> (дата обращения: 17.12.2024)
158. В технопарке «Русклимат ИКСЭл» электрические конвекторы собирают 14 промышленных роботов. – URL: <https://www.tadviser.ru/a/424010> (дата обращения: 25.12.2024)
159. ГОСТ Р 59853–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=1&month=1&year=2022&search=&id=242079> (дата обращения: 06.12.2024)
160. Definition of Additive Manufacturing – Gartner Information Technology Glossary. – URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/additive-manufacturing> (дата обращения: 01.12.2024)
161. Что такое Big Data? // Издательский дом «ПостНаука». – URL: <https://postnauka.ru/faq/46974> (дата обращения: 08.12.2024)
162. Big Data // Gartner Information Technology Glossary. – URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data> (дата обращения: 20.12.2024)
163. ГОСТ Р 57269–2016 Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред. Термины и определения. – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=205625> (дата обращения: 06.12.2024)
164. ГОСТ Р 56136–2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. – URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=188288> (дата обращения: 06.12.2024)
165. ГОСТ 2.101–2016 Единая система конструкторской документации. Виды изделий. – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=204710> (дата обращения: 06.12.2024)
166. Internet Of Things // Gartner Information Technology Glossary. – URL: <https://www.gartner.com/it-glossary/internet-of-things> (дата обращения: 20.12.2024)
167. Accelerating the Industrial Internet with the OMG Data Distribution Service // Real-Time Innovations. – URL: <https://www.dre.vanderbilt.edu/~schmidt/PDF/Industrial-Internet.pdf> (дата обращения: 20.12.2024)
168. Промышленный интернет вещей // CSoft. – URL: <https://www.csoft.ru/soft/iiot.html> (дата обращения: 20.12.2024)
169. ПНСТ 518–2021 (ИСО/МЭК 20924:2018) Информационные технологии (ИТ). Интернет вещей. Термины и определения. – URL: <https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&id=239659> (дата обращения: 06.12.2024)
170. Что такое интернет вещей и в каких устройствах он используется? // АО «Лаборатория Касперского». – URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/definitions/what-is-iiot> (дата обращения: 20.12.2024)
171. ГОСТ Р 59277–2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=239563> (дата обращения: 06.12.2024)
172. ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=206729> (дата обращения: 06.12.2024)

173. ГОСТ Р 57188-2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140574> (дата обращения: 08.12.2024)
174. ГОСТ Р 57700.3-2017 Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Термины и определения. – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=217642> (дата обращения: 06.12.2024)
175. ГОСТ 2.052-2021 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=6&page=0&month=3&year=2022&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=240552> (дата обращения: 06.12.2024)
176. Advanced Materials and Surface Finishing Processes – Kemet. – URL: <https://www.kemet.co.uk/blog/lapping/advanced-materials-and-surface-finishing-processes> (дата обращения: 20.12.2024)
177. ГОСТ Р 57700.2-2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=217662> (дата обращения: 06.12.2024)
178. ISO 8373:2021(en), Robotics – Vocabulary. – URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:en> (дата обращения: 25.12.2024)
179. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18038-2023 Информационные технологии. Компьютерная графика, обработка изображений и представление данных об окружающей среде. Представление сенсоров в смешанной и дополненной реальности. – URL: <https://meganorm.ru/Data/810/81051.pdf> (дата обращения: 01.12.2024)
180. Simulation Process and Data Management Will Drive Virtualization of Engineering Industry // ITC Infotech. – URL: <https://www.itcinfotech.com/wp-content/uploads/2020/12/simulation-process-and-data-management-will-drive-virtualization-of-engineering-industry-pov-ds2.pdf> (дата обращения: 20.12.2024)
181. Schönwald J., Forsteneichner C., Vahrenhorst D., Paetzold K. Improvement of Collaboration between Testing and Simulation Departments on the Example of a Motorcycle Manufacturer // Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. – 2019. – Vol. 1. – Issue 1. – P. 149-158. – DOI 10.1017/dsi.2019.18. – URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-international-conference-on-engineering-design/article/improvement-of-collaboration-between-testing-and-simulation-departments-on-the-example-of-a-motorcycle-manufacturer/05B1CEA6C9BDA2A2C121822C6DBF81B0> (дата обращения: 20.12.2024)
182. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201708030016> (дата обращения: 20.12.2024)
183. Product Data Management // CIMdata. – URL: <https://www.cimdata.com/en/resources/about-plm/cimdata-plm-glossary#PDM> (дата обращения: 20.12.2024)
184. Конструкторская подготовка производства // CSoft. – URL: <https://www.csoft.ru/soft/pdm.html> (дата обращения: 20.12.2024)
185. Product Lifecycle Management // CIMdata. – URL: <https://www.cimdata.com/en/resources/about-plm/cimdata-plm-glossary#PLM> (дата обращения: 20.12.2024)

186. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – URL: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 06.12.2024)
187. Рудник П.Б. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты: докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. – М. : Издательский дом Высшей школы экономики, 2021. – 239 с. – ISBN 978-5-7598-2510-4. – URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (дата обращения: 15.12.2024)
188. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. – URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6662/> (дата обращения: 30.11.2024)

## НАШИ ИЗДАНИЯ



**Функциональные характеристики отечественных систем автоматизированного проектирования (САД-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года):** монография / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова [и др.] – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 214 с.



**Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа (CAE-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года):** монография / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 228 с.



**Функциональные характеристики отечественных систем управления оборудованием с числовым программным управлением (САМ-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года):** монография / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова [и др.] – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 188 с.







**Функциональные характеристики отечественных систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года):** монография / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова [и др.] – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 174 с.



**Направления и формы сотрудничества отечественных разработчиков индустриального программного обеспечения с системой образования. Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на апрель 2024 года):** монография / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова [и др.] – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 132 с.



**Тренды и сценарии развития рынка авиационных двигателей, включая двигатели беспилотных летательных аппаратов, в 2023 году. Экспертно-аналитический доклад:** монография / А. И. Боровков [и др.] ; под ред. А. И. Боровкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 204 с.

Авторы: А. И. Боровков, Е. Р. Мартынец, Л. А. Щербина, Н. И. Прытков, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин







**Тренды и сценарии развития рынков решений в области цифровой трансформации промышленных компаний в рамках направления «Технет» НТИ в 2023 году.**

**Экспертно-аналитический доклад:** монография / А. И. Боровков [и др.] ; под ред. А. И. Боровкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 116 с.

Авторы: А. И. Боровков, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, Н. И. Прытков, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин



**Тренды и сценарии развития рынков, относящихся к «цифровой фабрике», по направлению «Технет» НТИ в условиях новой экономической реальности. Экспертно-аналитический доклад:** монография / А. И. Боровков [и др.] ; под ред. А. И. Боровкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 108 с.

Авторы: А. И. Боровков, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, Н. И. Прытков, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин



**Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности:** монография / под ред. А. И. Боровкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.

Авторы: А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, К. В. Кукушкин, А. А. Гамзикова





**Цифровые двойники: вопросы терминологии /**  
А. И. Боровков [и др.]. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021.  
– 28 с.

Авторы: А. И. Боровков, А. А. Гамзикова, К. В. Кукушкин,  
Ю. А. Рябов



**Передовые производственные технологии: возможно-  
сти для России. Экспертно-аналитический доклад:**  
монография / А. И. Боровков [и др.]; под ред. А. И. Бо-  
ровкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 436 с.

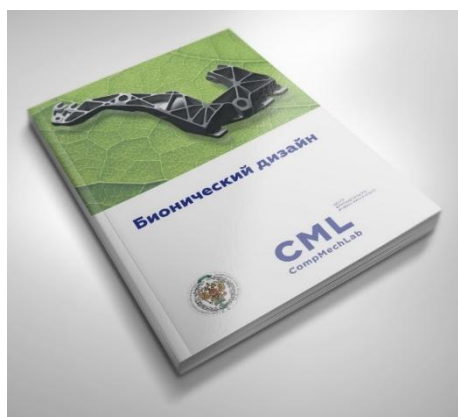
Авторы: А. И. Боровков, К. В. Кукушкин, А. А. Корчев-  
ская, А. Т. Хуторцова, Л. А. Щербина, Ю. А. Рябов,  
С. В. Салкуцан, Е. О. Касяненко, И. С. Метревели,  
К. О. Вишневский, Ю. В. Туровец, М. С. Липецкая,  
Д. В. Санатов, Н. С. Андреева, Е. А. Римских, В. А. Пас-  
тухов, Н. В. Гоголь, М. А. Королькова



**Цифровые двойники в высокотехнологичной промыш-  
ленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года) /**  
А. И. Боровков [и др.]. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.  
– 62 с.

Авторы: А. И. Боровков, А. А. Гамзикова, К. В. Кукушкин,  
Ю. А. Рябов





**Бионический дизайн:** монография / А.И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 92 с.

Авторы: А. И. Боровков, В. М. Марусева, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина



**Современное инженерное образование:** / А. И. Боровков [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.

Авторы: А. И. Боровков, С. Ф. Бурдаков, О. И. Клявин, М. П. Мельникова, В. А. Пальмов, Е. Н. Силина



**Компьютерный инжиниринг:** / А. И. Боровков [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.

Авторы: А. И. Боровков, С. Ф. Бурдаков, О. И. Клявин, М. П. Мельникова, А. А. Михайлов, А. С. Немов, В. А. Пальмов, Е. Н. Силина



## ОБ ИНФРАСТРУКТУРНОМ ЦЕНТРЕ НТИ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» СПБПУ

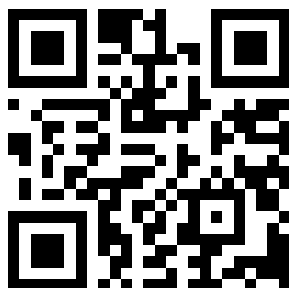
Инфраструктурный центр НТИ по направлению «Технет» СПбПУ (далее – Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ) создан в октябре 2024 года по итогам конкурсного отбора инфраструктурных центров направлений Национальной технологической инициативы (НТИ).

Деятельность Инфраструктурного центра «Технет» СПбПУ направлена на поддержку проектов, популяризацию технологий, разработку нормативных правовых актов, а также проведение аналитических исследований, в том числе в области цифровой трансформации промышленных компаний.

Цель программы Инфраструктурного центра «Технет» СПбПУ: формирование и развитие институциональной среды, обеспечивающей устойчивое формирование комплекса ключевых компетенций, обеспечивающих интеграцию отечественных передовых производственных технологий (ППТ) и бизнес-моделей для их распространения в качестве «Фабрик Будущего» первого и последующего поколений и нацеленных на создание глобально конкурентоспособной кастомизированной / персонализированной продукции нового поколения для рынков НТИ и высокотехнологичных отраслей промышленности в контексте национальных стратегических приоритетов импортонезависимости и технологического суверенитета РФ.

Достижению поставленной цели способствует выполнение следующих задач:

1. Поэтапное совершенствование нормативной правовой базы в целях устранения барьеров для использования передовых технологических решений и создания системы стимулов для их внедрения.
2. Развитие системы профессиональных сообществ и популяризация Национальной технологической инициативы.
3. Организационно-техническая и экспертно-аналитическая поддержка, информационное обеспечение Национальной технологической инициативы.
4. Создание механизмов акселерации компаний Национальной технологической инициативы и механизмов экспортного продвижения создаваемых продуктов.



*Боровков Алексей Иванович  
Мартынец Екатерина Романовна  
Щербина Людмила Александровна  
Нездоймышапко Людмила Андреевна  
Рябов Юрий Александрович  
Кукушкин Кузьма Викторович  
Хуторцова Екатерина Романовна  
Павлова Елизавета Ивановна  
Чхеидзе Екатерина Павловна*

**АРХИТЕКТУРА КРОСС-РЫНОЧНОГО,  
КРОСС-ОТРАСЛЕВОГО НАПРАВЛЕНИЯ «ТЕХНЕТ» НТИ  
(ВКЛЮЧАЯ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ  
КОМПОЗОВАННЫХ РЕШЕНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ)**

**Экспертно-аналитический доклад**

