



ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Экспертно-аналитический доклад

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ДОКЛАД

Монография



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2025

Рецензенты:

Кандидат технических наук, главный конструктор по цифровому моделированию
ООО «Центротех-инжиниринг»

В. В. Козин

Кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы передовых цифровых технологий
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

И. А. Керестень

Авторы:

А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова, И. И. Поняева,
Е. П. Чхеидзе, А. А. Старостенко, П. С. Распопина, А. С. Голякевич, С. А. Чварков,
Н. М. Луковникова, И. Б. Андреев, А. О. Ольховик, П. А. Джелали

Обзор технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли. Экспертно-аналитический доклад : монография / А. И. Боровков [и др.] ; под ред. А. И. Боровкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 176 с.

Экспертно-аналитический доклад, прошедший отраслевую экспертную оценку, формирует целостное представление о современном состоянии и перспективах развития технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли с основным фокусом внимания на сегменте атомного машиностроения. Приведены прогнозы развития атомной отрасли, рынка цифрового моделирования композиционных материалов, ключевые технологические и рыночные тенденции, возможности для роста и барьеры их развития в мире и в России с учетом поставленных задач обеспечения технологического суверенитета и лидерства, импортозамещения и развития собственной программно-технологической базы. Рассмотрены основные типы композиционных материалов и области их применения в атомной отрасли в мире и в России. Особое внимание в отчете уделено методам и инструментам моделирования полимерных композиционных материалов с учетом технологий изготовления, остаточной прочности, усталости, ползучести и трещинообразования, включая моделирование кинетики полимеризации для построения высокоадекватных математических моделей. Рассмотрены традиционные и перспективные подходы к цифровому моделированию материалов и конструкций в атомной отрасли, работающих в экстремальных условиях, с учетом процессов дефектообразования, в том числе под воздействием облучения. В докладе обосновывается важность применения технологии разработки цифровых двойников и программно-технологических (цифровых) платформ для проведения цифровых (виртуальных) испытаний, снижения себестоимости разработки и повышения точности прогнозирования остаточного ресурса изделий. Показано, что разработка новых материалов и технологий их цифрового моделирования является сквозным направлением, определяющим устойчивое развитие атомной отрасли и укрепление глобальных позиций Российской Федерации. Полученные в ходе подготовки экспертно-аналитического доклада результаты подкреплены данными отраслевых отчетов, практического опыта инжиниринговых и производственных организаций атомной отрасли, а также опроса отраслевых экспертов и участников рынка Национальной технологической инициативы (НТИ), проведенного Инфраструктурным центром «Технет» (передовые производственные технологии) при поддержке АНО «Платформа НТИ».

Подготовлен Инфраструктурным центром «Технет» (передовые производственные технологии) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК РИСУНКОВ	5
СПИСОК ТАБЛИЦ.....	7
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	8
ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ.....	12
1.1. Направления применения технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли	12
1.2. Текущее состояние рынка и ключевые события отрасли в мире	15
1.2.1. Текущее состояние атомной отрасли в мире	15
1.2.2. Текущее состояние и прогнозы роста рынка цифрового моделирования композиционных материалов в контексте атомной отрасли в мире	18
1.2.3. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по технологиям разработки и применению композиционных материалов в мире.....	29
1.2.4. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по применению технологий цифровых двойников в мире	33
1.3. Текущее состояние рынка и ключевые события отрасли в России	44
1.3.1. Текущее состояние атомной отрасли в России.....	44
1.3.2. Текущее состояние рынка цифрового моделирования композиционных материалов в контексте атомной отрасли в России	46
1.3.3. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по технологиям разработки и применению композиционных материалов в России.....	51
1.3.4. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по применению технологий цифровых двойников в России	56
ГЛАВА 2. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ.....	60
2.1. Основные тенденции, определяющие направления развития цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли.....	60
2.1.1. Тенденции развития атомной отрасли в мире	60
2.1.2. Тенденции развития рынка цифрового моделирования в мире.....	73
2.1.3. Российская специфика адаптации мировых трендов	74
2.2. Возможности для роста и ключевые барьеры развития в мире	79
2.2.1. Возможности для роста и ключевые барьеры развития атомной отрасли в мире.....	79
2.2.2. Возможности для роста и барьеры развития рынка цифрового моделирования композиционных материалов в мире.....	83

2.3.	Возможности для роста и ключевые барьеры в России.....	86
2.3.1.	Возможности для роста и ключевые барьеры развития атомной отрасли в России.....	86
2.3.2.	Возможности для роста и барьеры развития рынка цифрового моделирования композиционных материалов в России.....	90
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ, УСТАЛОСТИ, ПОЛЗУЧЕСТИ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ		93
3.1.	Методы цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли.....	93
3.2.	Технологии построения цифровых (виртуальных) испытательных стендов и полигонов для моделирования композиционных материалов.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		107
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ И РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ		110
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПРОФ. А.И. БОРОВКОВЫМ В СОАВТОРСТВЕ С ДРУГИМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯМИ		114
ГЛОССАРИЙ		126
БИБЛИОГРАФИЯ.....		137

СПИСОК РИСУНКОВ

Рисунок 1. ТОП-5 стран-лидеров по общей установленной мощности действующих реакторов по состоянию на 2024-2025 годы, МВт	17
Рисунок 2. Структура ответов о странах-лидерах в области атомной отрасли на 2025 год, % оценок респондентов	17
Рисунок 3. ТОП-5 стран-лидеров по выработке атомной электроэнергии в 2023-2024 годах, млрд кВт*ч.....	18
Рисунок 4. Динамика рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в 2020-2024 годах, млрд долл., прогноз до 2029	19
Рисунок 5. Текущие оценки объема мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов, млрд долл.....	22
Рисунок 6. Прогнозируемая динамика мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов в 2025-2033 годах, млрд долл.....	23
Рисунок 7. Структура ответов о текущем состоянии развития рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли, % оценок респондентов	23
Рисунок 8. Выработка электроэнергии на АЭС электроэнергетического дивизиона ГК «Росатом» в 2020-2024 годах, кВт*ч	44
Рисунок 9. Динамика доли ГК «Росатом» на мировом рынке фабрикация ядерного топлива и на мировом рынке обогащения урана в 2020-2024 годах, %.....	45
Рисунок 10. Динамика рынка инженерного ПО и ИТ-услуг (включая PLM-системы) в России в 2020-2024 годах, млрд руб.....	47
Рисунок 11. Динамика рынка российского инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в 2022-2024 годах, млрд руб.....	47
Рисунок 12. Выработка атомной энергии на АЭС мира по возрасту реактора	60
Рисунок 13. Схема сверхкритического водоохлаждаемого реактора (реактора с водяным охлаждением в сверхкритическом состоянии).....	64
Рисунок 14. Схема моделирования в среде VERA	64
Рисунок 15. Схема высокотемпературного газоохлаждаемого реактора	66
Рисунок 16. Схема жидкосолевого реактора.....	67
Рисунок 17. Быстрые реакторы на этапе строительства	69
Рисунок 18. Схема быстрого реактора со свинцовым теплоносителем.....	70
Рисунок 19. Динамика и прогноз производства электроэнергии АЭС в 2020-2050 годах, млрд т н.э.....	82
Рисунок 20. Динамика и прогноз производства электроэнергии АЭС в России в 2020-2050 годах, млн тнэ	86

Рисунок 21. Динамика и прогноз доли России в глобальном производстве электроэнергии АЭС в 2020-2050 годах, %	86
Рисунок 22. Динамика ключевых показателей, характеризующих технологическую независимость российского ТЭК, согласно Единому плану по достижению национальных целей развития Российской Федерации в 2024-2030 годах	87
Рисунок 23. Динамика достигнутого уровня технологической независимости в области создания новых атомных технологий, согласно Единому плану по достижению национальных целей развития Российской Федерации в 2024-2030 годах, %	88
Рисунок 24. Структура ответов об использовании специализированного ПО для проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов в организациях, прошедших опрос, % оценок респондентов.....	94
Рисунок 25. Структура ответов о планах по использованию специализированного ПО для проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов в организациях, прошедшей опрос, в ближайшие годы, % оценок респондентов.....	94
Рисунок 26. Концепция уровней многомасштабного моделирования для КМ.....	98
Рисунок 27. Структура ответов об использовании или планировании к использованию ПО при проектировании и моделировании изделий из композиционных материалов, в организации, прошедшей опрос, % оценок респондентов.....	99
Рисунок 28. Структура ответов о задачах, решаемых с использованием функциональных возможностей САД-систем в части проектирования композиционных материалов (КМ), % оценок респондентов	100
Рисунок 29. Структура ответов о задачах, решаемых с использованием функциональных возможностей САЕ-систем в части моделирование композиционных материалов, % оценок респондентов	101
Рисунок 30. Структура ответов по использованию специализированного ПО на этапах процесса разработки и постановки на производство изделий с применением конструкций из композиционных материалов, % оценок респондентов	102
Рисунок 31. Архитектура ВИП цифрового двойника композиционного материала.....	104
Рисунок 32. Эволюционная цепочка развития и наполнения цифрового двойника композиционного материала данными на Цифровой платформе по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®	105

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1. Основные типы композиционных материалов по ключевым областям применения в атомной отрасли на основе обзора научных публикаций	13
Таблица 2. ПО для решения задач цифрового моделирования в атомной отрасли.....	20
Таблица 3. Прогнозы развития мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов.....	22
Таблица 4. ПО для решения задач цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли на мировом уровне	24
Таблица 5. Ключевые кейсы по разработке и применению композиционных материалов в атомной отрасли в мире	29
Таблица 6. Ключевые примеры проектов с применением технологий цифровых двойников в атомной отрасли в мире.....	35
Таблица 7. Перечень проектов по разработке цифровых двойников малых модульных реакторов в мире	41
Таблица 8. Российское ПО для решения задач цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли	49
Таблица 9. Ключевые кейсы по разработке и применению композиционных материалов в атомной отрасли в России	51
Таблица 10. Быстрые реакторы на этапе эксплуатации и перезапуска.....	68
Таблица 11. Быстрые реакторы на этапе строительства	68
Таблица 12. Сравнительный анализ российской и зарубежных атомных отраслей	75
Таблица 13. Ключевые показатели развития атомной отрасли в мире в 2024–2050 годах.....	79

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Аббревиатура	Расшифровка	Перевод на русский язык
АЭС	Атомная электростанция	-
ВИП	Цифровой (виртуальный) испытательный полигон	-
ВИС	Цифровой (виртуальный) испытательный стенд	-
КМ	Композиционный материал	-
ММР	Малый модульный реактор	-
НИОКР	Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа	-
НИР	Научно-исследовательская работа	-
ОЯТ	Отработанное ядерное топливо	-
ПКМ	Полимерный композиционный материал	-
ПО	Программное обеспечение	-
РАО	Радиоактивные отходы	-
ТВС	Тепловыделяющая сборка	-
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент	-
AI	Artificial Intelligence	Искусственный интеллект (ИИ)
CAD	Computer-Aided Design	Средства автоматизированного проектирования [1], Системы автоматизированного проектирования (САПР) [2]
CAE	Computer-Aided Engineering	Средства инженерного анализа [1], Системы инженерного анализа и проектирования [2]
CAM	Computer-Aided Manufacturing	Средства управления оборудованием с числовым программным управлением [1], Системы автоматизации изготовления / производства [2]
CFD	Computational Fluid Dynamics	Вычислительная гидродинамика
FEM	Finite Element Method	Метод конечных элементов (МКЭ)
HTGR	High temperature gas-cooled reactor	Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР)
LWR	Light Water Reactor	Легководный реактор
BWR	Boiling Water Reactor	Кипящий (водо-водяной) реактор

Аббревиатура	Расшифровка	Перевод на русский язык
MBSE	Model-Based Systems Engineering	Модельно-ориентированный системный инжиниринг
MSR	Molten Salt Reactor	Жидкосольевой реактор (ЖСР) / реактор на расплавах солей
PDM	Product Data Management	Средства управления инженерными данными об изделии [1,2], Системы управления данными об изделии [2]
PLM	Product Lifecycle Management	Средства управления жизненным циклом изделия [1,2], Системы управления жизненным циклом изделия [2]
ROM	Reduced Order Models	Модели пониженного порядка
SCWR	Supercritical water reactor	Сверхкритический водоохлаждаемый реактора (реактор с водяным охлаждением в сверхкритическом состоянии)
SPDM	Simulation Process and Data Management	Средства управления процессами и данными компьютерного моделирования [1,2]

ВВЕДЕНИЕ

Экспертно-аналитический доклад подготовлен Инфраструктурным центром «Технет» СПбПУ с использованием данных отраслевых отчетов, практического опыта инжиниринговых и производственных организаций атомной отрасли, а также опроса экспертов и участников рынка Национальной технологической инициативы (НТИ). Результаты исследования направлены на содействие решению стратегических задач, связанных с достижением технологического лидерства и обеспечением технологического суверенитета Российской Федерации в области атомной энергетики и атомного машиностроения, что особенно важно в условиях усиливающейся глобальной конкуренции. Настоящий доклад формирует аналитическую основу для принятия управленческих и технологических решений по комплексному развитию технологий цифрового моделирования композиционных материалов, в том числе в атомной отрасли. Актуальность исследования обусловлена ростом значимости использования композитных конструкций в критически важных объектах атомной отрасли, повышением требований к безопасности, надежности и долговечности изделий, а также ускоренным развитием технологий цифрового моделирования.

Современный этап развития ядерных технологий предъявляет особые требования к конструкционным и функциональным материалам: расширенный диапазон эксплуатационных температур, повышенная радиационная стойкость, длительные сроки службы и устойчивость к сложным эксплуатационным режимам. Особое значение приобретают композиционные материалы, свойства которых могут целенаправленно изменяться за счет подбора матрицы и компонентов, что открывает возможности для создания легких, прочных, коррозионностойких и магнитоинертных конструкций. В частности, такие материалы рассматриваются как перспективная основа для оболочек тепловыделяющих элементов (далее – ТВЭЛ) и решений по утилизации отработавшего ядерного топлива (далее – ОЯТ), что напрямую связано с задачами повышения безопасности и эффективности атомной энергетики.

Развитие указанных направлений невозможно без опоры на передовые методы цифрового моделирования композиционных материалов и инженерное программное обеспечение, позволяющее проводить многоуровневое численное моделирование поведения материалов и конструкций в экстремальных условиях. Мировой рынок инженерного ПО демонстрирует устойчивый рост, отражающий усложнение проектируемых изделий и переход к интегрированному проектированию механических, электрических и программных систем, что в полной мере относится и к атомной отрасли. Для российского рынка дополнительным фактором актуальности выступает необходимость перестройки, ключевая задача которой – формирование суверенной программно-технологической базы для цифрового моделирования материалов и конструкций.

Экспертно-аналитический доклад посвящен комплексному анализу технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли – от оценки текущего состояния и динамики развития в России до выделения основных технологических тенденций развития отрасли в перспективе. Ключевым аспектом исследования выступает анализ направлений применения композиционных материалов в атомной отрасли, а также технологий их цифрового моделирования, включая специализированные цифровые платформы. Особое внимание уделяется вопросам информатики материалов и интеграции цифровых моделей в процессы проектирования и эксплуатации изделий атомного машиностроения.

Первая глава доклада посвящена анализу текущего состояния и динамики развития сферы цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли с учетом сегмента атомного машиностроения. В рамках главы рассматриваются направления применения технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли, проводится обзор основных типов композиционных материалов по ключевым областям применения, а также анализируются текущее состояние мирового и российского рынков, ключевые события отрасли, страны-лидеры, специализированные программные продукты. Приведены примеры реализованных российских и зарубежных проектов по технологиям разработки и применению композиционных материалов, а также применению технологий цифровых двойников в атомной отрасли, в том числе проекты по разработке цифровых двойников малых модульных реакторов (далее – ММР).

Во второй главе рассматриваются перспективы развития технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли. В подразделах представлены основные тенденции развития атомной отрасли и рынка цифрового моделирования композиционных материалов в мире, а также обозначена их российская специфика. Приведены прогнозы развития, включая ключевые возможности для роста и барьеры (технологические, организационные и рыночные) развития рынков в мире и в России.

Третья глава посвящена анализу технологий моделирования полимерных композиционных материалов (далее – ПКМ) с учетом технологий изготовления, остаточной прочности, усталости, ползучести и трещинообразования для атомной отрасли. В разделе рассматриваются методики моделирования процессов изготовления ПКМ, в том числе кинетики полимеризации, направленные на создание высокоадекватных математических и компьютерных моделей композиционных материалов, технологии построения цифровых (виртуальных) испытательных стендов (ВИС) и полигонов (ВИП) для моделирования композиционных материалов. Полученные результаты могут послужить базой для дальнейших научных исследований и разработок.

При формировании аналитических выводов в докладе учтен практический опыт инжиниринговых и производственных организаций атомной отрасли, включая требования к надежности, безопасности и прослеживаемости инженерных решений, характерные в том числе для предприятий контура ГК «Росатом». В целях сбора и систематизации информации для анализа текущего состояния и перспектив развития атомной отрасли и рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов, основных тенденций, барьеров (в т.ч. технологических) и возможностей для роста, а также ключевых событий в рамках текущего исследования Инфраструктурным центром «Технет» СПбПУ при поддержке АНО «Платформа НТИ» проведен опрос организаций-участников рынка НТИ и атомной отрасли. Опрос был направлен более чем 70 ключевым представителям. Ответы были получены от 12 респондентов, включая представителей ГК «Росатом», АО «ТВЭЛ», АО «ЮМАТЕКС», АО «НИКИЭТ», АО «НИИГрафит», АО «Росатом Наука», НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ООО «ТЕСИС» и др. Результаты опроса представлены сквозным образом в соответствующих разделах настоящего отчета.

ГЛАВА 1. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

В условиях нарастающей сложности промышленного производства одним из направлений обеспечения технологической устойчивости и формирования технологического суверенитета и лидерства государства становится применение технологий цифрового проектирования и моделирования, в частности – для разработки материалов и конструкций из них. Особую значимость указанное направление приобретает в контексте критически важных обеспечивающих отраслей промышленности, к числу которых относится атомная отрасль.

В рамках настоящего раздела рассматривается текущее состояние рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли с учетом сегмента атомного машиностроения. Анализ проводится по следующим блокам (подразделам):

- Направления применения технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли – общий обзор основных типов композиционных материалов по ключевым областям применения с опорой на актуальные научные публикации, а также обзор соответствующих направлений использования технологий цифрового моделирования.
- Текущее состояние мирового рынка и ключевые события отрасли, в т.ч. анализ основных показателей, характеризующих состояние атомной отрасли, выявление стран-лидеров, характеристика рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов, включая специализированные программные продукты, определение ключевых событий и актуальных примеров по технологиям разработки и применению композиционных материалов, технологий цифровых двойников.
- Текущее состояние российского рынка и ключевые события отрасли, в т.ч. анализ основных показателей, характеризующих состояние российской атомной отрасли и положение Российской Федерации на мировом рынке, характеристика рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов, включая специализированные программные продукты, определение ключевых событий и актуальных примеров по технологиям разработки и применению композиционных материалов, технологий цифровых двойников.

1.1. Направления применения технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли

Современный этап развития ядерных технологий предъявляет особые требования к материалам, такие как расширенный диапазон допустимых эксплуатационных температур, повышенную радиационную стойкость, длительный срок службы и т. д. В данном контексте за счет возможности регулирования технических и эксплуатационных характеристик посредством варьирования состава и свойств используемых компонентов особую актуальность приобретают композиционные материалы [3]. Указанный тип материалов, в частности, благодаря малому весу, гибкости, прочности и способности генерировать меньше вторичного излучения, становится альтернативой свинцу и другим тяжелым металлам при создании экранирующих конструкций [4].

Полимерные композиционные материалы (далее – ПКМ), в частности, используются для создания

легких экранов и средств персональной защиты. В качестве радиационно-защитных добавок применяются тяжелые наполнители (Bi, W, Pb) или борсодержащие компоненты. Например, полистирол-металлические композиционные материалы используют полистирол в качестве связующей основы, которую армируют высокодисперсными порошками металлов (Al, W, Fe) для создания легких панельных экранов. Углерод-углеродные композиционные материалы применяются в поглощающих элементах [5]. В настоящее время, композиционные материалы, армированные углеродными волокнами, используются в серийном производстве компонентов для оборудования, требующего экстремальных скоростей вращения и высокой устойчивости к нагрузкам. В то же время композиционные материалы с керамической матрицей наиболее перспективны при создании оболочек ТВЭЛ и элементов, работающих при высоких температурах и больших нагрузках [6]. Данное направление считается потенциально прорывным и активно исследуется в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (далее – НИОКР), как на российском, так и на мировом уровне. Кроме того, преимущественно на стадии научно-исследовательских работ, находится применение различных композиционных материалов для утилизации ОЯТ.

Принимая во внимание современные требования к функциональным и технологическим характеристикам, а также критерии экономической эффективности критически значимым для моделирования и проектирования как самих композиционных материалов, так и изделий и конструктивных элементов из них, является применение передовых производственных технологий. В качестве ключевых направлений цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли можно выделить следующие:

- Моделирование структуры на микро- и макро- уровнях, в т.ч. многоуровневое моделирование, связывающее процессы, происходящие в материале, на разных структурных уровнях вплоть до уровня изделия или конструкционного элемента, актуальное вследствие критической зависимости характеристик и поведения композиционных материалов от микроструктурных особенностей [6].
- Определение широкого спектра свойств: физико-механических, в т.ч. остаточной прочности, усталости, ползучести и трещинообразования [7], теплофизических [8], физико-химических, в т.ч. радиационно-защитных [9] и т. д.

Ключевые сведения об основных типах композиционных материалов, рассматриваемых в научно-технических публикациях в качестве перспективных для использования в атомной отрасли, а также направления использования технологий цифрового моделирования сведены в Таблицу 1.

Таблица 1. Основные типы композиционных материалов по ключевым областям применения в атомной отрасли на основе обзора научных публикаций

Тип материала	Матрица и наполнитель	Ключевые области применения	Основные направления использования технологий цифрового моделирования
Композиты с керамической матрицей	Керамическая матрица, армированная волокнами [8].	Оболочки ТВЭЛ, элементы, работающие при высоких	Многоуровневое моделирование для предсказания возникновения и роста

Тип материала	Матрица и наполнитель	Ключевые области применения	Основные направления использования технологий цифрового моделирования
		температурах и больших нагрузках [8].	дефектов, поведения под облучением. Моделирование теплофизических свойств [10].
Полимерные радиационно-защитные	Полимерная матрица с тяжелыми наполнителями (Bi, W, Pb) и борсодержащими компонентами [4,9].	Легкие экраны, персональная защита, облицовки оборудования [4,9].	Многоуровневое моделирование микроструктуры. Расчет радиационно-защитных свойств. Оптимизация состава для совмещения защитных и механических свойств [11].
Углерод-углеродные композиты	Графитовые матрицы, углеродные волокна [5].	Материалы поглощающих элементов [5].	Моделирование поведения в условиях облучения и высоких температур. Квантово-химическое моделирование для прогнозирования электронной структуры и свойств (например, теплопроводности) [7].
Тяжелые бетоны, армированные с волокнами	Тяжелый бетон с минералами (серпентин, барит) и борсодержащими волокнами [7].	Биологическое экранирование, барьеры для нейтронов/γ-излучения [7].	Моделирование и оптимизация состава для улучшения нейтронного экранирования. Учет типа армирования (1D) при прогнозировании эффективных свойств [7].
Полистирол/полимер + металл	Полимер с порошковыми добавками Al, W, Fe для γ-экрана и механического усиления [12].	Легкие панельные экраны с заданными механическими и защитными свойствами [12].	Проектирование под заданные характеристики. Верификация и валидация моделей для замены дорогостоящих экспериментов [12].

Тип материала	Матрица и наполнитель	Ключевые области применения	Основные направления использования технологий цифрового моделирования
Сцинтилляционные и композиционные детекторы	Керамические сцинтилляторы или композиции для 3D-печати детекторов [13,14].	Датчики и мониторинг облучения, прототипирование аддитивными методами [13,14].	Проектирование сложных геометрий и функциональных сборок для 3D-печати [14].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ, 2025

Основными направлениями применения композиционных материалов в атомной отрасли являются создание экранирующих конструкций, в т.ч. легких экранов и средств персональной защиты. Перспективным направлением НИОКР в рамках рассматриваемой области также считается проектирование и производство с использованием композиционных материалов оболочек ТВЭЛ и элементов, работающих при высоких температурах и больших нагрузках. Значимым направлением также является применение композиционных материалов для утилизации ОЯТ. Анализ актуальных научных публикаций показывает, что ключевыми направлениями развития композиционных материалов для атомной отрасли являются разработка нано- и гибридных наполнителей для повышения эффективности экранирования, применение аддитивных технологий для создания конструктивно сложных изделий и многоуровневого цифрового моделирования, интегрированного с данными ускоренных испытаний, для надежного прогнозирования срока службы и оптимизации составов. В рассматриваемом контексте особую значимость приобретают инструменты цифрового анализа и моделирования композиционных материалов, в частности, по направлениям: моделирование структуры на микро- и макроуровнях, в т.ч. многоуровневое моделирование, связывающее процессы на разных масштабах, а также моделирование широкого спектра свойств, в т.ч. физико-механических, теплофизических, физико-химических, включая радиационно-защитные.

1.2. Текущее состояние рынка и ключевые события отрасли в мире

1.2.1. Текущее состояние атомной отрасли в мире

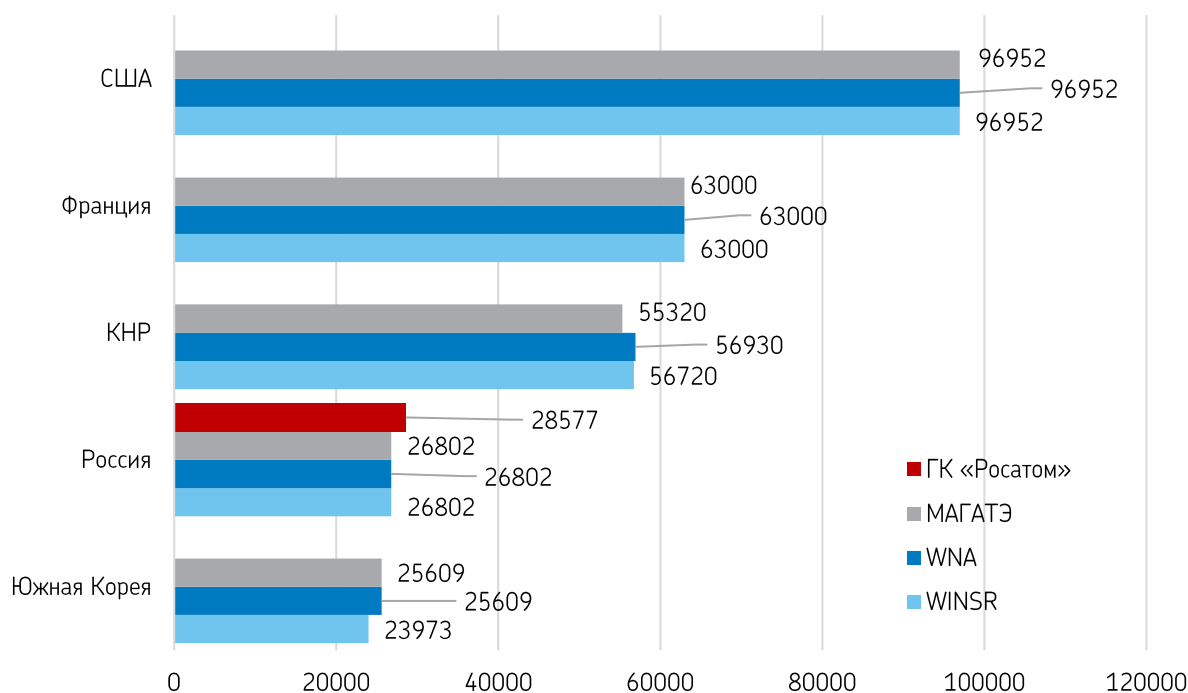
В рамках исследования текущего состояния цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли важно отдельно отметить сегмент атомного машиностроения, для которого применение цифровых инструментов и инженерного программного обеспечения является особенно актуальным. При этом, в рамках рыночного анализа и статистического учета данный сегмент преимущественно рассматривается единым блоком с иными отраслями энергетического машиностроения, включая такие виды экономической деятельности, как, например, производство двигателей и турбин (за исключением авиационных, транспортных и мотоциклетных двигателей), производство ядерных реакторов, паровых котлов, парогенераторов и т. д. (согласно актуальному классификатору статистического управления Европейского Союза [15]). Соответственно, наиболее целесообразным для решения задач настоящего исследования будет рассмотрение, прежде всего, состояния атомной отрасли, а также рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством.

По оценкам Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) [16], за последние пять лет инвестиции в атомную энергетику выросли на 50%, достигнув 74 млрд долл. в 2024 году. На атомную отрасль в настоящее время приходится около 9% от общего объема вырабатываемой электроэнергии [17–19]. При этом необходимо учитывать, что конкретные численные оценки ключевых параметров атомной отрасли в мире из различных источников имеют определенные расхождения. Так, например, по данным Международного агентства по атомной энергии (International Atomic Energy Agency, IAEA, МАГАТЭ) по состоянию на конец 2024 года зарегистрировано 417 ядерных реакторов, находящихся в эксплуатации. Общая установленная мощность атомных электростанций, при этом, (АЭС) составила 377 ГВт [17] (по оценкам на 23 октября 2025 года, 416 электростанций и 376 ГВт, соответственно [20]). На сайте Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA) – международной организации, объединяющей ведущие компании атомной отрасли, включая компании ядерно-топливного цикла, производителей реакторов, компании по обращению с радиоактивными отходами (далее – РАО), ОЯТ и т. д. – учтено 438 работающих ядерных реакторов (397 ГВт) [18]. В то же время, авторы ежегодных отчетов о состоянии мировой атомной отрасли (World Nuclear Industry Status Report, WINSR) [21] (под редакцией М. Шнайдера, члена-учредителя Международного консультативного совета по энергетике (International Energy Advisory Council, IEAC [22]), одного из основателей Международной группы по оценке ядерных рисков (International Nuclear Risk Assessment Group, INRAG [23])), в числе действующих по состоянию на октябрь 2025 года выделяют только 407 реакторов [19].

Отмеченные расхождения связаны, прежде всего, с различиями в методологии, а также возможной разницей в датах проведения учета. В частности, при учете реактора как «выведенного из эксплуатации» авторы ежегодных отчетов [21] опираются на фактическое прекращение производства электроэнергии, в то время как специалисты МАГАТЭ [20] в большей мере учитывают официальные информационные сообщения о политических решениях относительно вывода реактора из сети [24].

При этом отраслевые эксперты, по большей части, сходятся в оценках, определяющих мировых лидеров и в описании текущего статуса атомной отрасли в мировой энергетике (несмотря на определенные различия в оценках долгосрочных тенденций, барьеров и перспектив, а также – на отдельные расхождения относительно показателей-характеристик конкретных стран). Так, ТОП-5 стран по общей установленной мощности действующих реакторов включает: США, Францию, КНР, Россию, Южную Корею. В числе лидеров также Испания, Индия, Япония, Канада и другие. Необходимо отметить также, что оценки отдельных показателей, публикуемые ГК «Росатом» [25], координирующей развитие рассматриваемой отрасли в России, несколько отличаются от данных международной статистики, однако, отмечаемая разница не влияет на позиции страны в международных рейтингах (Рисунок 1).

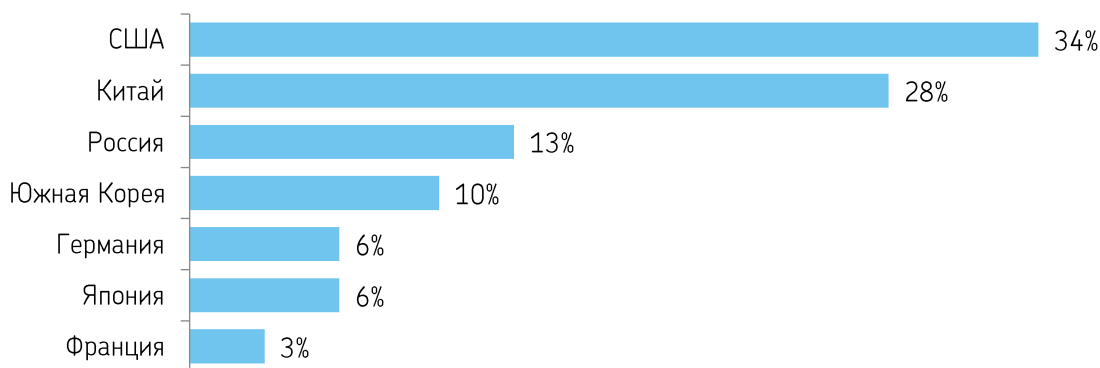
Рисунок 1. ТОП-5 стран-лидеров по общей установленной мощности действующих реакторов по состоянию на 2024-2025 годы, МВт



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [20], Всемирной ядерной ассоциации (WNA) [18], Отчета о состоянии мировой атомной отрасли (WINSR) за 2025 год [24], ГК «Росатом» [25], 2025

Согласно опросу российских представителей отрасли, проведенному Инфраструктурным центром «Технет», странами-лидерами в области атомной отрасли на 2025 год также являются: США, Китай и Россия. Более подробное распределение полученных ответов представлено на Рисунке 2. Вопрос подразумевал множественный ответ.

Рисунок 2. Структура ответов о странах-лидерах в области атомной отрасли на 2025 год, % оценок респондентов

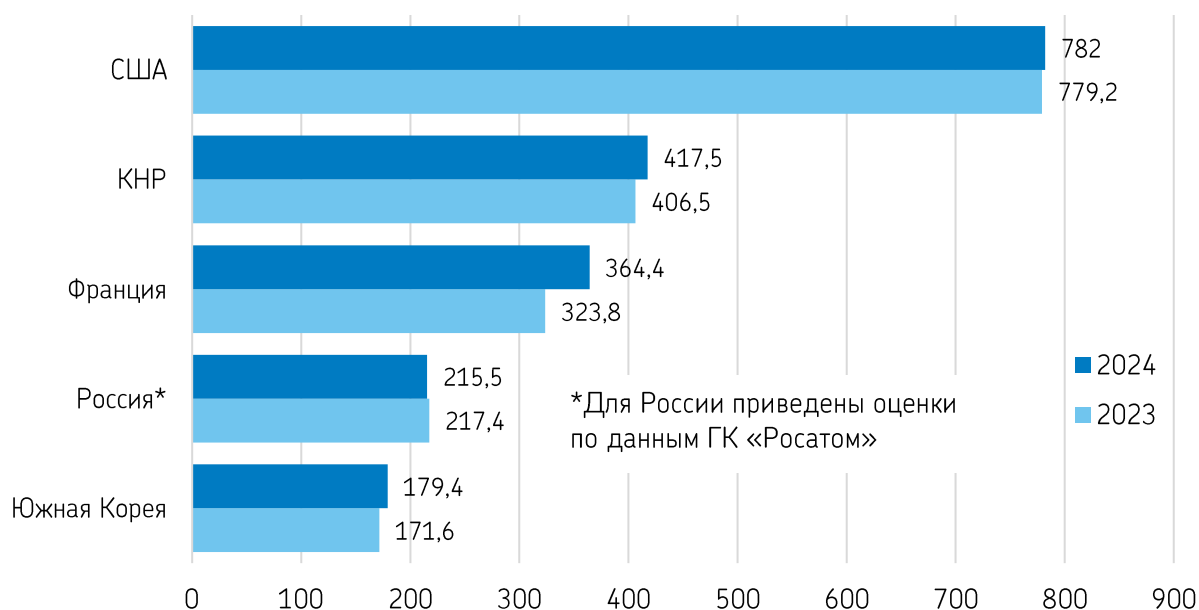


Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса, 2025

Согласно последним оценкам Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA) (от 30 сентября 2025 года) [26], общий объем производства атомной энергии в мире в 2024 году

составил 2 667 млрд кВт*ч., что на 4,8% превышает соответствующее значение предыдущего года (2 545 млрд кВт*ч.). Более 70% генерируемой атомной электроэнергии приходится на ТОП-5 стран. Лидером по выработке атомной электроэнергии является США, на втором месте (уступая почти в 2 раза по показателю) находится КНР. Российская Федерация, при этом, также входит в десятку стран-лидеров, занимая 4-е место (Рисунок 3).

Рисунок 3. ТОП-5 стран-лидеров по выработке атомной электроэнергии в 2023–2024 годах, млрд кВт*ч.



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Всемирной ядерной ассоциации [26], ГК «Росатом» [25], 2025

Атомная отрасль в последние годы демонстрирует устойчивый рост и занимает стабильные позиции на рынке мировой энергетики. В рассматриваемом сегменте сформировано ядро стран-лидеров, определяющих глобальную повестку, которое включает США, КНР, Россию, Францию, Южную Корею, Канаду, Японию, Индию, Испанию и др. Рост требований к эффективности, в т.ч. экономической и экологической, а также к безопасности атомных электростанций обуславливает интерес со стороны ключевых участников рынка к исследованиям и разработкам в области новых материалов, в том числе композиционных. В связи с вышеизложенным, как на глобальном уровне, так и на уровне отдельных стран, усиливается потребность в передовых технологиях и инструментах цифрового проектирования и моделирования, позволяющих разрабатывать материалы и конструкции из них под решение конкретных отраслевых задач при обеспечении экономической эффективности процессов разработки и производства.

1.2.2. Текущее состояние и прогнозы роста рынка цифрового моделирования композиционных материалов в контексте атомной отрасли в мире

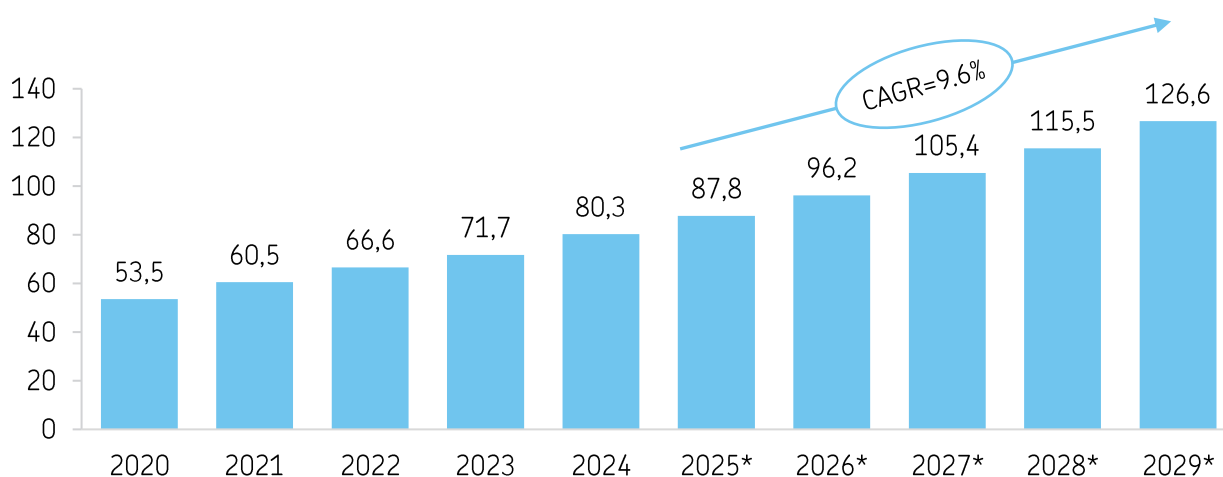
Мировой рынок инженерного ПО, включающий решения для применения в атомной отрасли, в том числе инструменты цифрового моделирования композиционных материалов, отличается высокой устойчивостью и консерватизмом. Международная консалтинговая организация CIMdata [27],

специализирующаяся в области систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем), оценивает совокупный объем рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в 2024 году в 80,3 млрд долл. [28]. В оценку включаются все основные функциональные модули, включая сегмент Simulation & Analysis (S&A), предназначенные для моделирования, анализа и оптимизации проектных решений. В последние годы рынок рос, в среднем, на 10,7% в год, что, в частности, связано с сохраняющейся тенденцией к усложнению выпускаемых изделий [28,29].

До 55% рассматриваемого рынка контролируется ограниченным числом организаций-лидеров, среди которых Siemens Digital Industries Software, Dassault Systemes, Hexagon AB и др. [30,31]. По оценкам аналитиков CIMdata к концу 2025 года рассматриваемый рынок может достичь 87,8 млрд долл. [32]. Ожидается дальнейший рост рынка до 126,6 млрд долл. к 2029 году, при росте рынка в среднем на 9,6% в год [32] (Рисунок 4).

Рисунок 4. Динамика рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в 2020–2024 годах, млрд долл., прогноз до 2029

* прогноз на основе CAGR



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным CIMdata [28,29], 2025

К сегменту «Simulation & Analysis (S&A)» эксперты CIMdata относят специализированное ПО для множества отраслей, в числе которых аэрокосмическая и оборонная, двигателестроение, тяжелое машиностроение (в том числе атомное) и др. При оценке долей рынка атомная энергетика не выделяется как отдельный сегмент в публичных отчетах CIMdata и агрегируется в категорию «Utilities», включающий электроэнергетику, распределительные сети, водоснабжение и атомную энергетку, а также частично входит в другие сегменты, например, «Mech Mach/Heavy Equip» и «Electron/Telecom/High Tech». В сегменте «Simulation & Analysis (S&A)» доля «Utilities» составляет примерно 4% [32,33]. Учитывая, что атомная энергетика является специализированным подсегментом «Utilities» и частично входит в ряд других сегментов, можно оценить ее долю внутри S&A примерно на уровне 4–10%.

В то же время, можно выделить ряд специфических инженерных программных продуктов, используемых для цифрового моделирования и проектирования непосредственно в атомной отрасли (Таблица 1).

Таблица 2. ПО для решения задач цифрового моделирования в атомной отрасли

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика
TRAD (Tests & Radiations), Франция	RayXpert®	RayXpert® – специализированный программный пакет, объединяющий работу с CAD-моделями и вычисления методом Монте-Карло. Система позволяет осуществлять различные дозиметрические расчеты на ядерных установках, производить работы для проектирования и расчета стен ядерных объектов, проектирования средств защиты от радиации, а также применяется в процессах обращения с ядерными отходами. Программный пакет способен импортировать 3D-модели из CAD-систем, таких как CATIA, SolidWorks и AutoCAD. Полученные данные могут впоследствии экспортироваться для анализа в CAE-системы [34].
Cyclife Digital Solutions, Франция	DEMplus®	DEMplus® – средство поддержки принятия решений и моделирования работ на объектах атомной отрасли с использованием 3D-визуализации в реальном времени. Система используется на всех этапах жизненного цикла АЭС – от проектирования и строительства, до вывода из эксплуатации и демонтажа объекта. Основные возможности системы лежат в сфере обеспечения безопасности и минимизации радиационного облучения персонала АЭС по принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable, на разумно достижимом низком уровне). Использование DEMplus® позволяет проектировщикам разрабатывать различные сценарии работ на радиационно опасных участках АЭС и планировать оптимальную последовательность производственных операций с точки зрения радиационной безопасности. Система способна импортировать данные как из крупных CAD-систем, так и данные, полученные 3D-сканированием объектов [35].
Svalinn Group, Висконсинский университет в Мадисоне, США (open-source)	DAGMC	DAGMC (Direct Accelerated Geometry Monte Carlo) – открытый (open source) программный инструмент для моделирования радиационного излучения с использованием геометрических моделей, созданных в CAD-системах. DAGMC используется в моделировании сложных трехмерных объектов, таких как термоядерные реакторы (ITER) и атомные реакторы. Система

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика
		позволяет разработчикам моделировать радиационную стойкость оборудования АЭС и проектировать средства защиты от радиации. Для работы DAGMC необходимо использование тяжелых CAD-систем (Siemens, CATIA или Solidworks) и дополнительных специальных средств подготовки файлов, таких как CUBIT [36].
FDS Team (Fusion Design Study), Хэфэйский научно-исследовательский институт физических наук, Китайская академия наук, КНР	SuperMC	SuperMC – многофункциональный программный пакет для нейтронно-физических расчетов и оценки безопасности систем, применяемых на атомных объектах. SuperMC использует данные, полученные из систем CAD. Система используется для расчетов при проектировании термоядерных реакторов (ITER, FDS-II) и реакторов на быстрых нейтронах (российский реактор БН-600). SuperMC позволяет осуществлять расчеты прохождения излучения, расчет выгорания топлива и расчет радиационного излучения после останова реактора. Система SuperMC способна импортировать данные из стандартных CAD-форматов через специализированные CAD-МС интерфейсы, разработанные FDS Team из Хэфэйского НИИ физических наук [37]. Возможен экспорт данных из SuperMC для использования в CAE-системах.

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным [34–37], 2025

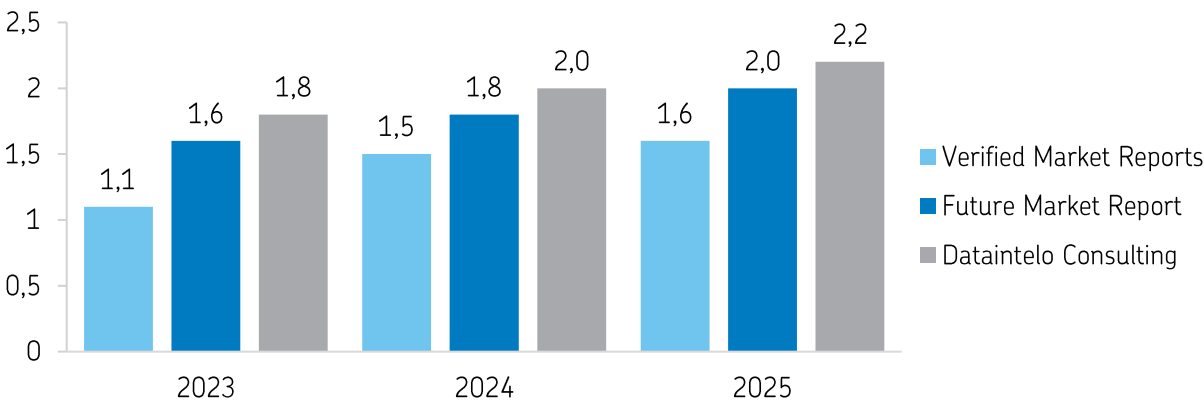
Сегмент ПО для анализа и моделирования композиционных материалов является частью «Simulation & Analysis (S&A)» и включает решения для прочностного анализа, расчета поведения материалов и оптимизации проектных конструкций. Основной спрос формируется авиа- и автопромом, производством электронных компонентов и энергетикой, где композиционные материалы широко применяются для улучшения прочностных характеристик и сокращения циклов проектирования.

По оценкам Mordor Intelligence [38] мировой рынок композиционных материалов составил 67,65 млрд долл. в 2025 году и, как ожидается, достигнет 86,67 млрд долл. к 2030 году при среднегодовом темпе роста 5,08% в течение прогнозируемого периода с 2025 по 2030 годы.

Рынок ПО для анализа моделирования композиционных материалов также растет, по оценкам, основанным на данных компании Goldbeck Consulting [39,40], специализирующейся в области цифрового моделирования материалов и информатики материалов, рассматриваемый сегмент в настоящее время прирастает, в среднем, на 7% в год. Необходимо отметить, при этом, что на инструменты цифрового моделирования материалов, включая сферу информатики материалов, приходится от 1% до

2% от общего объема мирового рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством [28,29,41,42]. В частности, по оценкам Goldbeck Consulting [39], объем рынка в 2024 году составляет 793 млн долл. [40]. В то же время, ряд представителей международного экспертного сообщества приводит более оптимистичные оценки – от 1,5 млрд долл. [43] до 2,0 млрд долл. [44] в 2024 году для сегмента ПО для анализа и моделирования композиционных материалов (Рисунок 5).

Рисунок 5. Текущие оценки объема мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов, млрд долл.



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным международных консалтинговых организаций, 2025

По прогнозам аналитиков мировой рынок ПО для анализа и моделирования композиционных материалов, в ближайшие годы ожидает рост на уровне 9–10% (Таблица 3) [43].

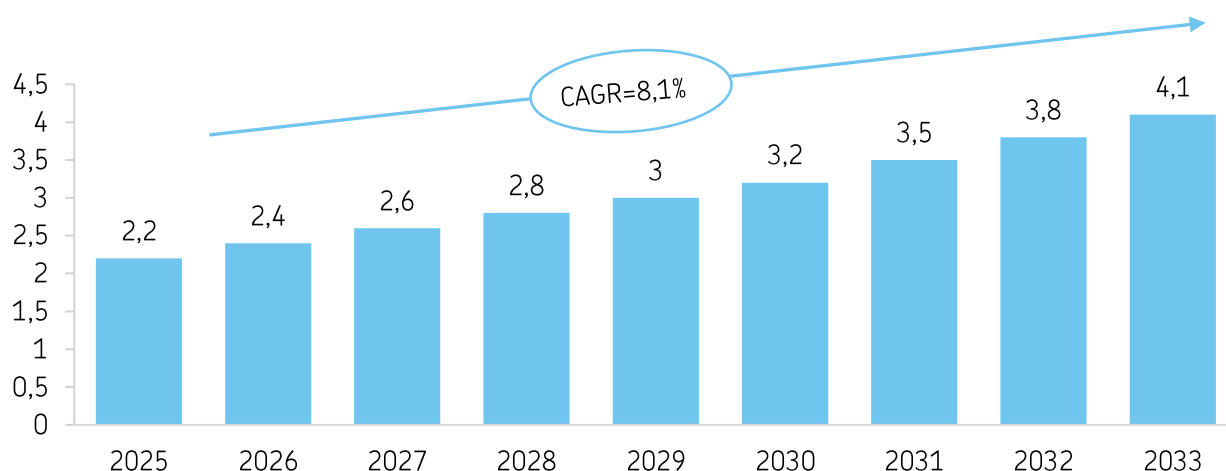
Таблица 3. Прогнозы развития мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов

Организация	Год публикации отчета	Оценка, млрд долл. (год)	Прогноз, млрд долл. (год)	CAGR, % (годы)
Dataintel Consulting [45]	2025	2,0 (2024)	4,2 (2033)	9,5% (2025–2033)
Verified Market Reports [43]	2025	1,5 (2024)	3,2 (2033)	9,2% (2025–2033)
Future Market Report [46]	2025	1,8 (2024)	3,9 (2032)	10,2% (2025–2033)

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным [43,45,46], 2025

В частности, специалисты международной консалтинговой организации Market Report Analytics [47] прогнозируют рост рассматриваемого рынка с 2,2 млрд долл. в 2025 году до 4,1 млрд долл. в 2033 году (Рисунок 6).

Рисунок 6. Прогнозируемая динамика мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов в 2025–2033 годах, млрд долл.



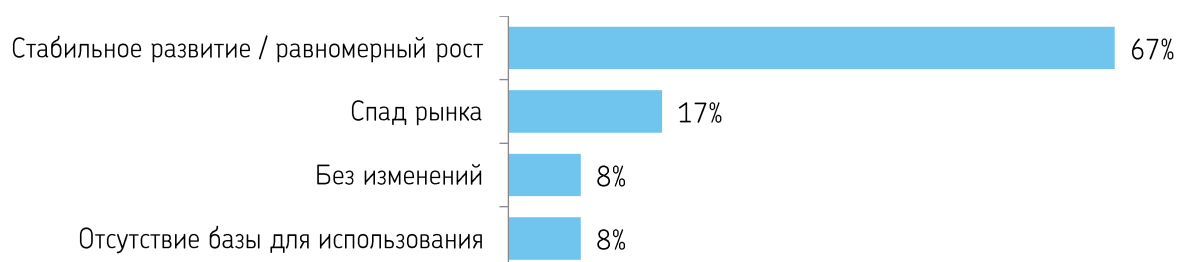
Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Market Report Analytics [47], 2025

В атомной энергетике применение композиционных материалов специализируется на конструктивных компонентах, оболочках и технологических узлах реакторных установок и т. д. Доля атомной отрасли в сегменте мирового рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов рассматривается как часть «Simulation & Analysis (S&A)», применяемого в сегменте «Utilities» и ряде других. Учитывая отраслевую структуру рынка и особенности использования композиционных материалов, на долю атомной энергетики в данном сегменте приходится 4–10% в 2024 году. Точные финансовые данные об использовании S&A в атомной промышленности часто не раскрываются в публичных отчетах из-за соображений безопасности, но с учетом всего вышесказанного можно оценить ее примерно в 0,4–1,0 млрд долл. в 2024 году. Данная оценка является примерной и основана на отраслевых данных CIMdata и аналитических исследованиях мирового рынка программного обеспечения для анализа и моделирования композиционных материалов.

Также по результатам проведенного Инфраструктурным центром «Технет» опроса, текущее состояние технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли в мире оценивается российскими участниками как стабильное развитие и / или равномерный рост. Распределение полученных ответов представлено на Рисунке 7.

Рисунок 7. Структура ответов о текущем состоянии развития рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли,

% оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса, 2025

Ключевые программные продукты, применяемые для решения задач цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли на мировом уровне, представлены в Таблице 4.

Таблица 4. ПО для решения задач цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли на мировом уровне

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
Siemens Digital Industries Software, США	NX Fibersim	Специализированное ПО для проектирования, моделирования и производства композиционных материалов и конструкций.	Учет специфики атомной отрасли непосредственно при проектировании конструкций, в т.ч. особенностей конкретных деталей. Интеграция разработки / моделирования / проектирования с производственными процессами. Открытая архитектура, совместимость с системами CAD/CAE/PLM, обеспечивающая автоматический обмен данными между системами и их актуализацию, в т.ч. поддерживающая взаимодействие между инженерами-проектировщиками и аналитиками [48].
	Simcenter Culgi software	Специализированное ПО для разработки материалов с заданными свойствами за счет многомасштабного моделирования химических и физических свойств.	Поддержка всего жизненного цикла разработки нового материала, включая проектирование, процесс производства, логистику и анализ рынка в рамках единой цифровой платформы. Моделирование материалов не только на макро-, но и на молекулярном уровне. Прогнозирование химических и физических свойств материалов, в т.ч. под реальные отраслевые задачи, как, например, разработка легких и термостойких композиционных материалов, создание прочных полимерных мембран для аккумуляторов и топливных элементов и др. [49].

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
	Simcenter 3D	Комплексная система инженерного анализа (CAE) [50].	Многомасштабное моделирование композиционных материалов внутри системы, выступающей как часть интегрированной многопрофильной среды моделирования, что позволяет прогнозировать свойства материала и оптимизировать характеристики конечного изделия, в т.ч. с учетом отраслевой специфики атомной промышленности. В частности, система включает модуль Simcenter 3D Laminate Composites для моделирования многослойных композитных конструкций (непрерывные волокна) [51,52].
	NX Composites	Модуль, объединяющий возможности Fibersim и CAD/CAM/CAE-системы NX.	Проектирование композиционных материалов и конструкций внутри платформы NX [53,54].
	Designcenter	Программный пакет для ускорения разработки продуктов, включающий ряд инструментов компьютерного проектирования [55].	Управление проектированием, моделированием и производством композиционных материалов и конструкций в рамках единого пакета программных решений [56].
Altair Engineering, США (с 2025 года входит в структуру Siemens AG [57])	Altair HyperWorks	Платформа, поддерживающая набор инструментов для разработки и производства изделий [58].	Поддержка разработки и производства изделий с применением композиционных материалов, интеграция и функциональная совместимость решений в рамках единой среды, поддерживающей сквозные процессы проектирования и валидации [58].
	Altair ESAComp	Продукт для проектирования и анализа композитов [59].	Проектирование композитных конструкций, интегрируется с HyperWorks для улучшения процессов пред- и постобработки расчетов с композиционными материалами, предлагает базу данных материалов [59].

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
	Altair OptiStruct	Продукт для прогнозирования разрушения композиционного материала [60].	Прогнозирование разрушения композиционного материала, обеспечение процесса проектирования композиционных материалов (расчет оптимального количества слоев и последовательности укладки) [60].
	Altair Multiscale Designer	Решение для многомасштабного моделирования материалов [61].	Моделирование всех видов поведения материалов, от однородного изотропного до гетерогенного анизотропного [61].
	Altair RapidMiner	Продукт для использования существующих данных о материалах с помощью технологий машинного обучения [62].	Создание моделей синтетических материалов и открытие новых составов [62].
Dassault Systèmes, Франция	BIOVIA Materials Studio	Продукт для разработки ПКМ [63].	Использует многомасштабное моделирование, в том числе моделирование динамики, для разработки ПКМ и изделий с их применением [63].
	SIMULIA Structural Simulation	Решение для структурного моделирования [64].	Обеспечивает математическое и компьютерное моделирование конструкций из композиционных материалов с учетом микронеоднородной структуры и физико-механических характеристик [64].
Hexagon AB, Швеция	Digimat (MSC Software)	Цифровая платформа нелинейного многомасштабного моделирования материалов и структур [65].	Микромеханическое моделирование сложных многофазных материалов: пластиков, композитов, металлов, эластомеров; применяется для анализа материала на микро-, мезо- и макроуровнях, включая моделирование 3D-печати с учетом остаточных напряжений и деформаций [65].
	Hexagon MaterialCenter	Инструмент для работы с данными о материалах [66].	Предлагает инструменты для поиска, построения графиков и анализа данных о материалах;

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
			интегрируется с MaterialCenter Databanks, предоставляющей базу коммерчески доступных данных о материалах [66].
Cadence Design Systems, США	OpenEye Cadence Molecular Sciences	Программное обеспечение, разработанное приобретенной компанией OpenEye Scientific Software [67].	Моделирование молекулярной динамики и проведение инженерных расчетов на базе облачной платформы [67].
COMSOL, Швеция	COMSOL Multiphysics	Платформа для мультифизического моделирования [68].	Включает библиотеку материалов, насчитывающую более 17 130 материалов, включая полимеры и композиционные материалы с металлической и керамической матрицей [68].
	Composite Materials Module	Дополнение к модулю структурной механики [69].	Предоставляет специализированные инструменты моделирования и анализа слоистых композитных структур [69].
Autodesk, США	Autodesk Inventor Nastran	Интегрированное решение для моделирования конструкций [70].	Проведение моделирования конструкций с учетом свойств материалов. Использование встроенной базы данных материалов для задания анизотропных свойств композитов [70].
PTC, США	Creo Parametric	Пакет решений, объединяющий системы CAD, CAM и CAE в единое программное обеспечение [71].	Проведение сквозного проектирования изделий из композиционных материалов, включая создание 3D-модели, генеративное проектирование, проведение инженерных расчетов, компьютерное моделирование, построение рабочих процессов аддитивного производства и др. (на базе технологий Ansys) [71].
Synopsys, США	QuantumATK	Программное обеспечение для моделирования на атомарном уровне [72].	Использует молекулярную динамику для моделирования материалов на уровне атомов; применяется для расчета механических, тепловых и других

Разработчик, страна	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
			свойств, моделирования полимеров, кристаллов и т. д. [72].
	Simpleware	Программное обеспечение для обработки и сегментации данных 3D-изображений [73].	Позволяет описывать композитные микроструктуры и определять эффективные свойства материалов [73].
Ansys (с 2025 года входит в структуру Synopsys [74]), США	Ansys Composite PrepPost (ACP)	Препроцессор для многослойных композитных структур [75].	Построение и визуализация сложных укладок и конструкции из композиционных материалов [75].
	Ansys Granta MI	Продукт для управления информацией о материалах [76].	Создание, управление и хранение данных о материалах, интегрирован с CAD-, CAE- и PLM-системами [76].
	Ansys Multiphysics + Multiscale.Sim	Интегрированная цифровая платформа, включающая систему многомасштабного анализа [77].	Решение задач, связанных с моделированием и определением свойств материалов на микроуровне [77].
ESI Group (с 2023 года входит в структуру Keysight Technologies)	PAM-COMPOSITES	Программная система для моделирования технологических процессов [78].	Моделирование и анализ технологических процессов изготовления композиционных материалов и деталей из них на различном промышленном оборудовании [78].
JSol Corporation, Япония	J-Composites	Пакет программ для моделирования формования композитов [79].	Моделирование различных процессов формования композиционных материалов; включает инструменты для анализа прессования и визуализации потока смолы [79].
	J-ОСТА	Программное обеспечение для многомасштабного моделирования [80].	Позволяет прогнозировать свойства на микроуровне для разработки широкого спектра высокоэффективных материалов, таких как нанокompозиты, с интеграцией технологий машинного обучения [80].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Как показывает анализ, рынок цифрового моделирования композиционных материалов является сегментом мирового рынка инженерного ПО, демонстрировавшего в последние годы уверенный рост. Более половины общего объема указанного мирового рынка контролируется ограниченным числом компаний, при этом набор программных продуктов и модулей, предназначенных для анализа и моделирования композиционных материалов, предлагаемый организациями-лидерами, достаточно разнообразен. Большинство отмеченных продуктов и модулей может быть адаптировано для решения задач анализа и моделирования композиционных материалов в различных отраслях, включая атомную.

1.2.3. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по технологиям разработки и применению композиционных материалов в мире

Раздел включает примеры, связанные с использованием и разработкой композиционных материалов для атомной отрасли в мире. В качестве основных направлений использования композиционных материалов в атомной отрасли в настоящее время можно обозначить следующие:

- Изготовление компонентов из композиционных материалов с использованием углеродного волокна, в том числе для роторных систем. В настоящий момент это направление является хорошо освоенным и находится на стадии серийного изготовления коммерческих установок.
- Потенциально прорывное направление изготовления тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) с композитной оболочкой на основе карбида кремния. В настоящее время по этому направлению ведутся активные НИОКР и ОКР как в России, так и в западных странах. Ожидается, что промышленное использование таких ТВЭЛ станет возможным в 2030х–2045х годах и может серьезно изменить атомную отрасль, за счет серьезного увеличения безопасности атомных электростанций и создания возможности для значительного повышения эффективности атомных реакторов благодаря более высокой устойчивости ТВЭЛ с композитными оболочками к сверхвысоким температурам. В настоящее время мировая атомная отрасль находится на стадии осуществления НИР/НИОКР и изготовления опытных экземпляров.
- Применение различных композиционных материалов для утилизации ОЯТ. В настоящее время данное направление преимущественно находится на этапе НИР.

Ключевые кейсы мирового уровня в рассматриваемой отрасли сведены в Таблицу 5.

Таблица 5. Ключевые кейсы по разработке и применению композиционных материалов в атомной отрасли в мире

Кейс	Организация, страна	Характеристика
Оболочки для толерантного топлива (ATF) из композиционных материалов на основе карбида кремния (SiC)	General Atomics, США	Карбид кремния (SiC) длительное время используется в различных отраслях промышленности. Высокая твердость и способность выдерживать исключительно высокую температуру позволяют эффективно применять карбид кремния в сфере создания режущих инструментов, огнеупорных

Кейс	Организация, страна	Характеристика
		материалов и элементов высокомоощных энергетических систем. Компания General Atomics Electromagnetic Systems (GA-EMS) разработала композиционный материал с керамической матрицей из карбида кремния под торговой маркой SiGA®, предназначенный для создания нового «толерантного ядерного топлива» (ядерного топлива, устойчивого к авариям) [81]. Работы по созданию толеранного ядерного топлива были инициированы американскими государственными органами власти после аварии на АЭС Фукусима в 2011 году. В материале SiGA® используется многослойная конструкция – внутренний слой состоит из композиционного материала для обеспечения прочности и устойчивости к трещинам, внешний слой – из монолитного материала на основе SiC для эффективного удержания ядерного топлива и продуктов деления [82]. Оболочка из материала SiGA® выдерживает температуру свыше 1700°C, что более чем в два раза выше, чем у традиционных циркониевых сплавов, разрушение которых начинается уже при 800°C. Такие свойства материала значительно сокращают риск аварий с выделением взрывоопасного водорода. В 2024 году были изготовлены первые образцы оболочек с использованием материала SiGA®, что по утверждению разработчиков подтверждает масштабируемость имеющейся технологии. Полная коммерциализация технологии ожидается в 2030–х годах. Разработки в сфере использования карбида кремния для ТВЭЛ, в рамках программы создания толерантного ядерного топлива также ведет компания Framatome, ведущая как собственные исследования, так и заявившая о партнерстве с General Atomics [83].
Ремонт трубопроводов с помощью углепластика (CFRP) на АЭС	University of Notre Dame, АЭС Брансуик (Brunswick), США	В последние десятилетия в американской атомной отрасли становится все более распространенной практика использования композиционных материалов для ремонтных работ [84]. В 2015 году на АЭС Брансуик (Brunswick) в США был успешно выполнен ремонт выпускных трубопроводов циркуляционной воды с использованием композиционных материалов на основе полимеров,

Кейс	Организация, страна	Характеристика
		армированных углеродным волокном (углепластиков, CFRP). Использование углепластика позволяет сократить затраты времени и средств на ремонт, что особенно важно во время плановых остановок реактора.
3D-печать радиационно-защитных материалов	Additive Composite и Add:North, Швеция	Компании Additive Composite и Add:North в 2019 году разработали инновационный материал – филамент (нить для 3D-принтера) Addbor N25 на основе карбида бора и нейлона. Созданный материал предназначен для использования на наиболее распространенных и доступных FDM-принтерах [85]. Использование карбида бора в материале позволяет служить ему в качестве средства защиты от радиационного излучения. По мнению разработчиков, новый материал может использоваться на атомных электростанциях и в лабораториях, работающих с радиационными технологиями [86].
Герметизация радиоактивных отходов (РАО) с применением геополимеров	Lucideon, Великобритания	Компания Lucideon (Великобритания) разработала решение MALLETT™ с применением технологии MIDAR®, основанное на использовании геополимерных связующих, предназначенное для экономически эффективной и устойчивой герметизации радиоактивных отходов средней степени радиоактивности [87]. Решение позволяет значительно сократить физический объем конечных радиационных отходов в 1,4 раза, что позволяет сократить затраты на транспортировку и захоронение РАО и сделать этот процесс более безопасным для окружающей среды [88].
Композитные подшипники для главных циркуляционных насосов	Dalian Sanhuan Composite Material Technology Development Co., Ltd., Китай	В 2018 году китайская компания Dalian Sanhuan Composite Material Technology Development Co., Ltd., специализирующаяся на разработке подшипников, в том числе из композиционных материалов, создала композитные упорные самосмазывающиеся шариковые подшипники для главного циркуляционного насоса атомной электростанции «Хуалун-1» [89].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Во всем мире продолжает усиливаться интерес к развитию и применению композиционных материалов в атомной отрасли, что связано как с требованиями к повышению безопасности и ресурса оборудования, так и с задачами создания новых поколений ядерных установок. Композиционные материалы рассматриваются в качестве ключевого элемента будущих ядерных топливных циклов и

инновационных конструкций, что находит отражение в тематике крупнейших международных научно-технических мероприятий (конференций, семинаров, научных форумов) последних лет. В программах многих крупных мероприятий формируются отдельные тематические блоки, посвящённые вопросам разработки и применения композиционных материалов в атомной отрасли. На этих мероприятиях рассматриваются, в частности, такие ключевые вопросы, как поведение композиционных материалов в условиях интенсивного радиационного облучения, использование композиционных оболочек и конструкций в ядерном топливном цикле, обеспечение долговечности и отказоустойчивости оборудования, а также валидация новых материалов. Существенное внимание уделяется вопросам нормативного регулирования и стандартизации, включения композиционных материалов в проекты инновационных ядерных систем, а также интеграции материаловедческих исследований с цифровыми технологиями моделирования, прогнозирования ресурса и сопровождения жизненного цикла изделий. В совокупности это подтверждает, что проблематика разработки и применения композиционных материалов стала неотъемлемой частью глобальной повестки развития атомной энергетики. Ниже представлены некоторые значимые мероприятия, прошедшие в мире в 2024–2025 годах, на которых были рассмотрены вопросы применения композиционных материалов в атомной отрасли:

- *NuMat 2024 (Nuclear Materials Conference) – Сингапур – 2024 г.* Конференция, организованная в сотрудничестве с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), основной фокус которой – поведение композиционных материалов в ядерном топливном цикле и проблематика радиационного воздействия на материалы [90].
- *FISA EURADWASTE & SNETP FORUM 2025 – Польша – 2025 г.* Прошедшая под председательством Польши в Совете ЕС конференция FISA EURADWASTE 2025 и интегрированный в нее форум SNETP, направленные на продвижение роли ядерной энергетики в переходе Европы на чистую, устойчивую и безопасную энергию с акцентом на безопасность ядерного деления, обращение с ОЯТ и использование таких материалов, как покрытые циркониевые оболочки и композиционные материалы на основе карбида кремния [91].
- *Materials in Nuclear Energy Systems 2025 (MiNES 2025) – США – 2025 г.* Научная конференция, проводимая совместно Обществом минералов, металлов и материалов (TMS) и Американским ядерным обществом (ANS), ключевые темы для обсуждения которой включили микроструктурные процессы в облученных материалах, ядерное топливо и композиционные материалы для реакторных сред [92].
- *Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS-7) – Испания – 2025 г.* Седьмой международный семинар по структурным материалам для инновационных ядерных систем, организованный совместно Агентством по ядерной энергии ОЭСР (NEA) и Центром энергетических, экологических и технологических исследований (CIEMAT), целью которого является обмен информацией о текущих программах исследований материалов для ядерных систем, в том числе керамических композиционных материалов и других инновационных материалов [93].
- *International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP) – Франция – 2025 г.* Международный конгресс по достижениям в области атомной энергетики (ICAPP), организованный Французским ядерным обществом (Sfen), в число ключевых тем повестки которого вошли топливо, материалы и конструкции, а также вопросы топливного цикла и управления отходами, где композиционные материалы рассматриваются как важный элемент повышения

надёжности и эффективности установок [94].

- *Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT28) – Канада – 2025 г.* Конференция для обсуждения вопросов структурной механики в реакторных технологиях и инновациях, организованная совместно Канадским ядерным обществом (CNS), Канадской комиссией по ядерной безопасности (CNSC) и Международной ассоциацией структурной механики в реакторных технологиях (IASMiRT), включает такие направления, как механика материалов и конструкций, вычислительное моделирование и визуализация, вопросы топливных циклов, инфраструктуры, управления отходами и вывода из эксплуатации, а также новые технологии – аддитивное производство, ИИ и цифровые двойники [95] и др.

Потенциальные прорывные эффекты от использования обуславливают высокое внимание к тематике композиционных материалов в атомной отрасли. Вместе с тем, высокие требования к надежности и безопасности разработок, подкрепленные строгими отраслевыми регламентами, стандартами и нормативами обуславливают необходимость существенных временных и финансовых затрат разработчиков, как в процессе непосредственно проектирования и разработки композиционных материалов и конструкций, так и в процессе их сертификации. Сказанное выше, в свою очередь, закладывает фундамент для расширения применения передовых технологий цифрового проектирования и моделирования композиционных материалов в атомной отрасли, в т.ч. технологии цифровых двойников.

1.2.4. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по применению технологий цифровых двойников в мире

Передовые производственные технологии, такие как технологии цифровых двойников, платформы разработки и применения цифровых двойников, позволяют атомной отрасли повысить эффективность проектирования и эксплуатации ключевых объектов и систем, включая реакторные установки, технологические узлы, теплообменники, насосные и трубопроводные системы и др., а также инфраструктурные и вспомогательные элементы атомных объектов. В мире различаются подходы к определению цифрового двойника. В 2021 году был принят национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [96], в котором дано определение цифровому двойнику изделия и описание его применения на всех стадиях жизненного цикла (разработка, производство, эксплуатация). ГОСТ Р 57700.37–2021 включен в перечень взаимно признаваемых стандартов в сфере авиационного сотрудничества между Китайской Народной Республикой и Российской Федерацией.

Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021, цифровой двойник изделия (ЦД изделия) представляет собой систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и (или) его составными частями. Цифровая модель изделия, в свою очередь, – система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая его структуру, функциональность и поведение на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504–81 [97] выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям [96].

Ниже рассмотрены примеры (кейсы), связанные с внедрением технологий цифровых двойников в атомной энергетике в мире.

В 2024 году компания General Atomics Electromagnetic Systems (GA-EMS) объявила о выполнении

этапа работ по разработке цифрового двойника ядерного топлива в рамках грантовой программы министерства энергетики США. Задачей проекта выступало применение возможностей моделирования для ускорения процесса лицензирования топлива для существующих и перспективных реакторов. В ходе реализации GA-EMS были разработаны четыре отдельных программных модуля производительности для работы с перспективными топливными сборками, использующими разработанную компанией композитную оболочку SiGA® из карбида кремния [98].

В компании GA-EMS отмечают, что после завершения разработки этот цифровой двойник позволит прогнозировать работу оболочки SiGA в активной зоне ядерного реактора, сократить затраты на разработку и испытания топлива, а также уменьшить время, необходимое для получения разрешения на использование этой революционной технологии без ущерба для безопасности [99].

Четыре модели, основанные на физических принципах, используются для исследования влияния радиационного облучения на напряженно-деформированное состояние оболочки SiGA. Многоуровневый подход к моделированию, использованный в проекте, позволяет оценить отклик конструкции как на микроуровне, так и на уровне всей реакторной установки. В будущем созданные математические и компьютерные модели должны быть интегрированы в единый цифровой двойник [99].

Компании GA-EMS по ядерным технологиям и материалам удалось ускорить разработку и проверку отдельных моделей, используя опыт национальной лаборатории в Лос-Аламосе и национальной лаборатории в Айдахо. В рамках проведенных работ для каждой разработанной модели GA-EMS выполняла специализированные лабораторные испытания. Сейчас в компании ожидают перехода к следующему этапу, когда математические и компьютерные модели будут интегрированы в систему – цифровую модель, и далее – цифровой двойник, что позволит выйти на новый уровень сложности и точности для эффективного прогнозирования характеристик ядерного топлива [98].

Функциональное ядро применяемого инструмента суррогатного моделирования основано на подходе к формированию моделей пониженного (сокращенного) порядка (Reduced Order Models, ROM-моделей), созданных в национальной лаборатории Лос-Аламос, использующей базу данных о возможном поведении элементов из композиционного материала на основе SiC-SiC (в материале SiGA из карбида кремния созданы как матрица, так и наполнитель) в различных условиях и под различными нагрузками. Вышеуказанная модель в дальнейшем будет использоваться вместе с программным кодом для моделирования ядерного топлива BISON, что позволит осуществить полноценное моделирование производительности ядерного топлива [99].

Во Франции с 2020 года реализуется инициатива «Цифровой атомный реактор», в которой участвуют крупнейшие научные организации, такие как Комиссия по атомной энергии (CEA), машиностроительные компании, такие как главный французский производитель оборудования для АЭС, концерн Framatome, и энергетическая компания Électricité de France (EDF). В целом, для создания цифровых двойников всех энергетических реакторов, используемых во Франции, привлечено более 100 экспертов из различных организаций. Задачей инициативы является создание сервисной платформы для проведения передовых исследований французских реакторов и цифрового (виртуального) испытательного стенда для проведения мультидисциплинарных цифровых (виртуальных) испытаний, а также формирование платформы для обучения операторов АЭС [100,101].

Ключевыми элементами цифрового испытательного стенда в инициативе «Цифровой атомный реактор» являются следующие:

- Общая модель физических данных EFICAS (Editeur de Fichier de Commandes et Analyseur Semantique). EFICAS позволяет централизованно хранить все релевантные данные для описания реактора и сценариев штатных и внештатных ситуаций. В общей модели рассматриваются такие категории данных как технологические данные (сборки и геометрические описания активной зоны реактора), эксплуатационные данные, данные сценариев нагружения (для описания процесса, подлежащего расчету) и данные цифровой модели (варианты моделирования, принятые для каждого физического параметра). Для работы с моделью используется открытое программное обеспечение, доступ открыт для сторонних исследователей через платформу SALOME [102].
- Платформа для совместной работы над кодом «C3PO» (Collaborative Code Coupling PlatfOrm), созданная в формате библиотеки Python. Платформа C3PO также разрабатывается как проект открытого ПО и доступна через ресурс Git-hub [103].

Работа с технологиями цифровых двойников также лежит в основе деятельности созданного в 2018 году дочернего предприятия Électricité de France – компании Metroscope [104], специализирующейся на разработке программного обеспечения для мониторинга и диагностики в энергетической отрасли. Среди других европейских компаний можно отметить компанию Iberdrola, важным компонентом инновационной стратегии которой является использование технологий цифровых двойников [105].

Кроме того, в 2020 году Министерство энергетики США профинансировало программу GEMINA (Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets, «Генерация электроэнергии с помощью интеллектуальных ресурсов в ядерной сфере»), направленную на разработку цифровых двойников оборудования, используемого на американских атомных электростанциях. Задачей проекта является десятикратное сокращение затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание АЭС следующего поколения [106]. При этом в декабре 2023 года исследователями Национальной лаборатории Айдахо и Государственного университета Айдахо был создан цифровой двойник исследовательского реактора AGN-201 [107].

На уровне Европейского союза, в частности, в рамках Европейской совместной программы по управлению радиоактивными отходами (European Joint Programme on Radioactive Waste Management, EURAD-2) [108] реализуется стратегический проект «Цифровые двойники нового поколения для поддержки оптимизации, строительства и эксплуатации поверхностных и подземных объектов по обращению с радиоактивными отходами (DITOCO2030)» [109] и т. д.

Ключевые примеры зарубежных проектов в рассматриваемой сфере представлены в Таблице 6.

Таблица 6. Ключевые примеры проектов с применением технологий цифровых двойников в атомной отрасли в мире

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
Цифровой двойник мобильной горячей камеры	Национальная лаборатория Айдахо Министерства энергетики США	2023	В рамках работ по созданию мобильной горячей камеры (mobile hot cell) [110] разработан цифровой двойник

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
	при поддержке Министерства энергетики США и Управления радиологической безопасности (NNSA ORS)		горячей камеры для управления финальной стадией жизненного цикла радиоактивных источников [111]. Цифровой двойник мобильной горячей камеры рассматривается разработчиками как мультифизическая и междисциплинарная модель высокого уровня. Физические компоненты цифрового двойника включают в себя роботизированную руку и сварочные компоненты. Операционный механизм цифрового двойника, согласно представлениям разработчиков, состоит из четырех основных этапов. 1. На первом этапе создаются реплики физических моделей и активов в цифровой среде при помощи таких систем 3D-моделирования, как SolidWorks, Blender, FreeCAD и Unity3D. 2. На втором этапе объединяются данные физической и цифровой сред для мониторинга и точного измерения накопления мощности дозы облучения. 3. На третьем этапе производится проверка накопления дозы облучения и работоспособности компонентов с помощью программного пакета MCNP (Monte Carlo N-Particle). 4. Финальный этап, в зависимости от задач и условий, сводится к постоянной разработке, оптимизации и итеративному изменению моделей, используемых в цифровом двойнике, для изучения

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
			поведения материалов в различных моделируемых условиях [111]. Цифровой двойник мобильной горячей камеры предназначен для выполнения трех основных функций в работе с источниками радиации – мониторинга и измерения радиации, роботизированных манипуляций (при помощи роботизированного манипулятора) и проведения экспериментов. Использование цифрового двойника должно позволить моделирование потенциальных ситуаций в виртуальной среде моделирования до проведения физических экспериментов, рассчитывать и контролировать накопление доз радиационного облучения, что может помочь исследователям в предсказании потенциальных проблем и рисков работы с радиоактивными отходами [111].
Beartooth: испытательный стенд ядерного топливного цикла на базе модельно-ориентированного цифрового инжиниринга и технологий цифровых двойников	Национальная лаборатория Айдахо Министерства энергетики США	2022-н.в.	Исследовательский испытательный стенд предназначен для проведения операций по растворению, разделению и конверсии специального ядерного материала – плутония (Pu), обогащенного урана (EU/LEU/HEU/HALEU), тория (Th), смесей U/Pu (MOX) и др. Проект, в частности, направлен на решение проблемы, связанной с использованием одного испытательного стенда для исследования различных топливных циклов и заключающейся в широком спектре химических веществ

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
			и процессов, которые необходимо исследовать. Beartooth предполагает интеграцию данных, поступающих от датчиков контрольно-измерительных приборов и систем управления с цифровыми моделями. Цифровой (виртуальный) испытательный стенд разрабатывается на базе платформы для управления данными DeepLynx, при использовании инструментов ИИ и машинного обучения, что позволяет выстраивать цифровую модель комплексной реконфигурируемой системы и в последствии может быть использовано для дистанционной проверки новых материалов на соответствие требованиям МАГАТЭ [112–114].
Внедрение технологии цифровых двойников для безопасного вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС в Оскарсхамне (Швеция)	AFRY (инжиниринговая компания), OKG (энергетическая компания, оператор АЭС)	2017–2025	Работы сконцентрированы на безопасном выводе из эксплуатации энергоблоков 01 и 02, остановленных в 2017 году. Основным направлением работ стал контролируемый перенос систем управления и управляющей логики из старого диспетчерского пункта в новый – процесс, требующий высокой степени надежности, минимизации рисков и верификации изменений перед непосредственной реализацией [115]. Ключевой задачей проекта стало использование цифрового (виртуального) испытательного стенда для моделирования сценариев модификаций, тестирования

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
			программного кода контроллеров и оценки безопасности до начала физических работ. Технология цифровых двойников позволяет выявлять потенциальные ошибки на ранних этапах проектирования и обеспечивать высокую степень готовности управляющих алгоритмов до начала работы с реальной (физической) инфраструктурой, что способствует сокращению сроков пусконаладочных работ и натурных испытаний, повышает качество внедряемых решений и снижает операционные риски. Согласно общей методологии, подход потенциально позволяет достичь до 95% готовности кода программируемых логических контроллеров до физического внедрения и сократить время разработки проекта до 30%. Таким образом, цифровой двойник выступает как элемент обеспечения безопасности, непрерывности и управляемости процессов при выводе из эксплуатации сложных промышленных объектов [116]. Пилотный проект на базе технологии цифровых двойников доработан до полнофункционального решения и в настоящее время применяется специалистами АЭС в Оскарсхамне [115,116].
Развитие экосистемы цифровых двойников для оптимизации очистки ядерных отходов	Washington River Protection Solutions (WRPS) (подрядчик Министерства энергетики США), Twinn (панее Lanner,	2016–2025	Проект, направленный на ускорение и повышение эффективности процессов управления ядерными отходами, инициирован клиентом Washington River Protection Solutions (WRPS), который

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
на площадке Хэнфорд (США)	разработчик ПО), Royal Haskoning DHV (консультант по данным и ИИ)		является подрядчиком Министерства энергетики США и отвечает за очистку территории Хэнфорд в Ричленде, штат Вашингтон США. На данной площадке хранится 56 млн галлонов ядерных отходов. Реализация проекта началась с 2016 года в рамках партнерства с экспертами компании Twinn (ранее известной как Lanner). Основная цель проекта – оптимизация и безопасное управление ликвидацией ядерных отходов, в т.ч. сокращение затрачиваемого времени, с учетом того, что эксплуатационные расходы составляют миллионы долларов в день. Ключевая задача, стоявшая перед исследовательской группой, заключалась в ускорении анализа данных за счет использования возможностей моделирования, а также в развитии потенциала цифровых двойников для обеспечения качественного и быстрого принятия решений. В частности, в рамках проекта разработано облачное приложение, позволяющее параллельно анализировать ряд сценариев «что-если». Для автоматизации анализа выходных данных моделирования и поиска потенциальных узких мест использованы инструменты на базе ИИ и машинного обучения. Министерство энергетики США признало проект эталонным, а сотрудничество с Twinn перешло в следующую фазу, направленную на дальнейшее развитие возможностей

Проект	Организации-участники	Годы реализации	Ключевые характеристики
			моделирования с использованием суррогатных моделей [117].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Также важно отметить ряд проектов по разработке цифровых двойников ММР (Таблица 7).

Таблица 7. Перечень проектов по разработке цифровых двойников малых модульных реакторов в мире

Реактор	Разработчик (страна)	Годы реализации	Описание проекта цифрового двойника
XAMR® microreactor	NAAREA (Франция)	2023	Цифровой двойник перспективного микрокреатора XAMR® был реализован французским стартапом NAAREA в сотрудничестве с компаниями Assystem и Dassault Systèmes. Задача цифрового двойника XAMR® – создать централизованную среду работы с данными реактора на всех этапах жизненного цикла от проектирования и эксплуатации до вывода из эксплуатации, а также сократить общие временные затраты на разработку реактора. В рамках работ по созданию цифрового двойника был создан операционный тренажер для обучения персонала [118].
Xe-100	X-energy (США)	2021-2023	В рамках инновационной программы Министерства энергетики США ARPA-E GEMINA стартапом X-energy был разработан цифровой двойник перспективного реактора Xe-100 мощностью 80 МВт. Основной задачей создания цифрового двойника была обозначена необходимость снижения затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание реактора до 2 долларов США за МВтч [119]. В рамках работ по созданию цифрового двойника были созданы два специализированных средства моделирования – мультидисциплинарная 3D-модель Immersive Environment Toolset [119] для оптимизации технического обслуживания и обеспечения безопасности и набор цифровых инструментов X-Data DATA (Xe-100 Data Analytics Tools & Applications) [120], в котором заявляется

Реактор	Разработчик (страна)	Годы реализации	Описание проекта цифрового двойника
			совместное использование механизмов цифрового двойника и технологий ИИ и машинного обучения.
BWRX-300	GE Research (США)	2020-2023	Компания GE Research, получившая поддержку от Министерства энергетики США в рамках программы ARPA-E GEMINA, разработала цифровой двойник перспективного малого реактора BWRX-300 в сотрудничестве с Окриджской национальной лабораторией и университетом Теннесси (Ноксвилл). Целью проекта было заявлено создание цифрового двойника с предиктивным обслуживанием (Predictive Maintenance Digital Twin, PMDT). Ключевыми функциями разработанного цифрового двойника в проекте заявлены непрерывный мониторинг, раннее предупреждение о возможных авариях, диагностика состояния оборудования и методики и прогнозирование работы реактора [121]. В рамках работ использовалась концепция «Скромного ИИ» (Humble AI) с повышенным вниманием к безопасности, надежности и производительности, ранее опробованная в работе с ветрогенераторами и газовыми турбинами [122].
eVinci™ Microreactor	Westinghouse Electric (США)	2023-н. вр.	Одна из ключевых компаний американской атомной отрасли Westinghouse в партнерстве с университетом Карнеги-Меллон разрабатывает систему мониторинга реактора на базе цифрового двойника для своего проекта перспективного микрореактора eVinci™ мощностью 5МВт, позиционируемого компанией как «атомная батарея» [123]. Задача проекта – исследование механизма встраивания датчиков в микрореакторы для отслеживания производительности и встраивания системы поддержки принятия решений для эксплуатации и технического обслуживания атомного реактора. В рамках проекта предполагается создание общей модели для типа реактора и специально

Реактор	Разработчик (страна)	Годы реализации	Описание проекта цифрового двойника
			калиброванных моделей для каждого экземпляра [123].
NuScale Power Module™	NuScale Power / Aras (США)	2020	Американский стартап NuScale Power объявил о внедрении системы управления жизненным циклом продукта от компании Aras для создания модели – «цифровой нити» для разрабатываемого малого модульного реактора NuScale Power Module™ (60МВт). Инициатива позиционируется не как классический цифровой двойник, а как комплексная система управления данными и требованиями на всем протяжении жизненного цикла [124]. В рамках совместного проекта предполагается создание единой цифровой системы для всех требований от высокоуровневых до требований конкретной единицы оборудования. Также через систему предполагается управление всеми изменениями в проектировании реактора, автоматизация инженерных задач и управление данными CAE. По заявлениям разработчиков, создаваемая АЭС с реактором NuScale Power Module™ должна стать первой атомной электростанцией, использующей PLM в качестве единого источника данных [124].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Рассмотренные примеры демонстрируют эффективность применения технологий цифровых двойников для ускорения лицензирования, повышения безопасности и надежности реакторных систем, оптимизации эксплуатационных процессов. Цифровые двойники становятся ключевым инструментом для моделирования поведения сложных систем и материалов, а также для поддержки технического и нормативного контроля, что особенно важно для атомной отрасли.

Во всём мире в последние годы формируется устойчивая повестка, связанная с внедрением технологий цифровых двойников в атомной отрасли. На ведущих международных конференциях, форумах и специализированных семинарах обсуждаются вопросы создания высокоточных цифровых моделей ядерных установок, интеграции расчётных и экспериментальных данных, обеспечения прослеживаемости решений в течение всего жизненного цикла объектов, а также использования цифровых двойников для повышения безопасности и оптимизации режимов эксплуатации. Значительное внимание уделяется архитектурным решениям цифровых платформ, методам верификации и валидации моделей, взаимодействию с системами управления и средствами неразрушающего контроля, а также регуляторным и организационным аспектам применения цифровых двойников в ядерной

энергетике. На этом фоне особый интерес представляют ряд международных мероприятий 2024–2025 годов, где эти вопросы получили содержательное и системное освещение:

- *The Digital Nuclear Reactor Initiative: First steps towards advanced applications* – Франция – 2024 г. Конференция, посвященная запущенному в 2020 году масштабному научно-исследовательскому проекту «Цифровой ядерный реактор» (The Digital Nuclear Reactor Initiative). Целью проекта является разработка цифрового двойника, включающего два инновационных продукта: сервисную платформу и тип моделирования, отвечающий растущему спросу на обучение «точно в срок». В материалах конференции представлен обзор архитектурных решений, реализованных для обеспечения модульной структуры платформы [125].
- *International Conference on Nuclear Engineering (ICONE32)* – Китай – 2025 г. Международная конференция для специалистов в области ядерных технологий, организованная подразделением инжиниринга Американского общества инженеров-механиков (ASME), Японским обществом инженеров-механиков (JSME) и Китайским ядерным обществом (CNS). Частью программы мероприятия является трек, посвященный CFD-моделированию [126] и др.

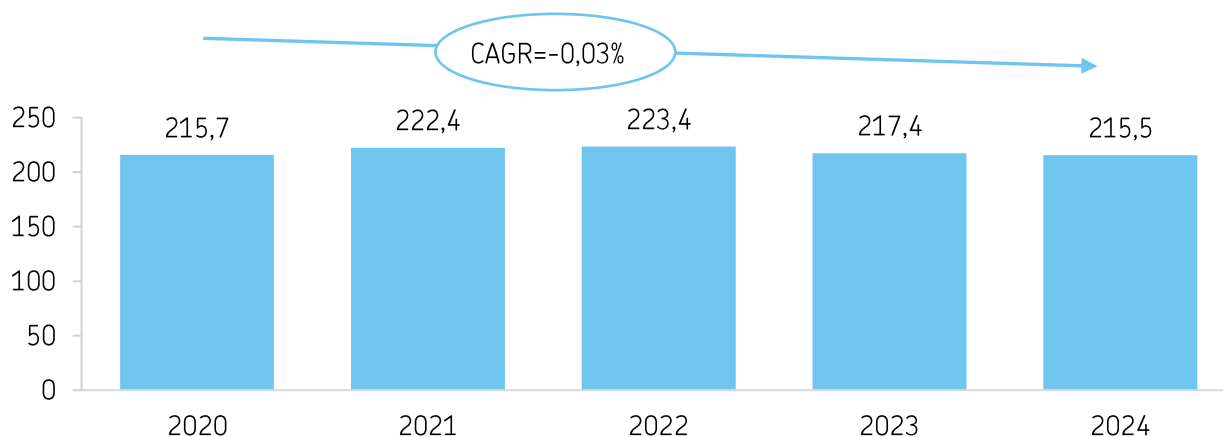
Таким образом, внедрение технологий цифровых двойников выступает ключевым направлением передовых производственных технологий и стратегическим инструментом цифровизации атомной отрасли на мировом уровне.

1.3. Текущее состояние рынка и ключевые события отрасли в России

1.3.1. Текущее состояние атомной отрасли в России

Как было сказано выше, по состоянию на 2024 год, Российская Федерация занимает 4-е место в мире по общей установленной мощности действующих реакторов, а также по объему производства атомной энергии [18,20,24,26], несмотря на некоторое снижение объемов выработки в 2023–2024 годах (Рисунок 8) [25].

Рисунок 8. Выработка электроэнергии на АЭС электроэнергетического дивизиона ГК «Росатом» в 2020–2024 годах, кВт*ч



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным ГК «Росатом» [25], 2025

В то же время, ГК «Росатом», координирующая развитие рассматриваемой отрасли в России, в последние 5 лет стабильно занимает 3-е место в мире на рынке фабрикации ядерного топлива и 1-е место – на рынке обогащения урана (Рисунок 9) [127–131].

Доля атомной энергии в общем объеме электроэнергии, вырабатываемой в стране, в последние годы сохраняется на уровне около 20% [26,132]. В рассматриваемом контексте необходимо отметить также, что Российская Федерация сохраняет ведущие позиции в производстве атомных реакторов, оставаясь ключевым мировым экспортером [133]. ГК «Росатом» лидирует по величине портфеля заказов на сооружение АЭС, занимая более 90% мирового рынка строительства АЭС и центров ядерной науки [134]: на разной стадии реализации находится 41 энергоблок в 11 странах [132].

Рисунок 9. Динамика доли ГК «Росатом» на мировом рынке фабрикации ядерного топлива и на мировом рынке обогащения урана в 2020–2024 годах, %



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным ГК «Росатом» [25], 2025

С 2014 года в России действует (и регулярно актуализируется) государственная программа «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» [135], направленная на осуществление крупномасштабных государственных мероприятий по закреплению и расширению глобальных преимуществ, которыми обладают российская атомная энергетика и промышленность, сохранение стратегических интересов и решению важнейших геополитических задач в целях надежного обеспечения национальной безопасности и суверенитета Российской Федерации [135]. Ключевым стратегическим документом, определяющим направления технологического развития российской атомной отрасли, является Комплексная программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденная Указом Президента РФ от 16.04.2020 № 270 [136] и продленная Указом Президента РФ от 14.02.2022 № 202 [137]. В число отмеченных направлений входят, в частности, следующие:

- Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий.
- Создание современной экспериментально-стендовой базы для разработки технологий двухкомпонентной атомной энергетике с замкнутым ядерным топливным циклом.

- Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий.
- Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем.
- Проектирование и строительство референтных энергоблоков атомных электростанций [138].

Кроме того, с 2025 года в России действует Национальный проект «Новые атомные и энергетические технологии», цель которого заключается в обеспечении мирового лидерства Российской Федерации в атомных технологиях и технологического суверенитета в новых энергетических технологиях [139,140].

Комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства», утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 4 июля 2023 года № 1789-р [141], направлена на удовлетворение растущего спроса в области композиционных материалов и изделий из них, в том числе для атомной отрасли. При этом в указанной программе в качестве основной проблемы отмечена импортозависимость отечественного производства. В частности, доля импорта термореактивных эпоксидных смол по состоянию на 2023 год составляла 98,5%, что создает высокие риски для атомной промышленности Российской Федерации. Кроме того, в целом, доля импорта волокон и материалов доходила до 50%, а доля импорта оборудования, запасных частей, инструментов, принадлежностей и ПО, в среднем, составляла 90% [141]. Соответственно, развитие сферы цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли в российском контексте в настоящее время приобретает особую значимость.

1.3.2. Текущее состояние рынка цифрового моделирования композиционных материалов в контексте атомной отрасли в России

Российский рынок инженерного программного обеспечения, включающий решения для применения в атомной отрасли, в том числе инструменты цифрового моделирования композиционных материалов, в 2022 году столкнулся с необходимостью перестройки и существенной реорганизации в связи с уходом значительной части иностранных вендоров и, в целом, с нарастающими санкционными ограничениями. По оценкам консалтинговой компании Strategy Partners [142], проблемы в обслуживании ИТ-систем возникли у около 70% российских компаний [143]. В то же время, в 2022–2024 годах отраслевые эксперты [143,144] отмечают рост и восстановление рынка.

По оценкам Strategy Partners [143], объем российского рынка инженерного ПО и ИТ-услуг (включая PLM-системы) составил 50 млрд руб. по состоянию на 2024 год. При этом доля российских разработчиков ПО и интеграторов с 2020 года выросла с 48% до 90% (Рисунок 10). Аналитики Strategy Partners [143] прогнозируют рост рынка до 2030 года до 122 млрд руб. при росте в среднем на 16% в год, при этом российские компании займут около 93% рынка.

Рисунок 10. Динамика рынка инженерного ПО и ИТ-услуг (включая PLM-системы) в России в 2020-2024 годах, млрд руб.

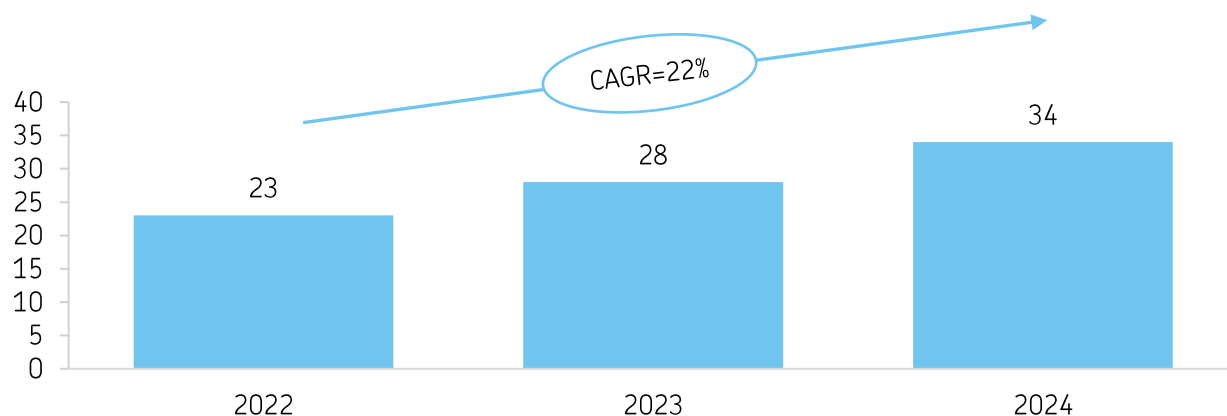


Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Strategy Partners [143], 2025

В то же время, объем российского рынка инженерного ПО и ИТ-услуг без учета PLM-систем по состоянию на 2024 год оценивается в 32 млрд руб., а на долю российских разработчиков и интеграторов приходится 84% общего объема рынка. К 2030 году рынок вырастет до 74 млрд руб., при среднегодовом темпе роста в период 2024-2030 годов на уровне 15%. Доля российских участников рынка к 2030 году возрастет с 84% до 93% общего объема.

Эксперты Группы компаний Б1 [145] оценивают рынок российского инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в 2024 году в 34 млрд руб., отмечая среднегодовой рост рынка в 2022-2024 годах на уровне 22% (Рисунок 11) [144]. В то же время экспертами прогнозируется рост рынка в 2024-2032 годах на уровне 9% в год в среднем. Отраслевые эксперты подчеркивают, что потенциал роста рассматриваемого рынка будет реализовываться преимущественно до 2027-2028 годов.

Рисунок 11. Динамика рынка российского инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в 2022-2024 годах, млрд руб.



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Группы компаний Б1 [144], 2025

Российский рынок композиционных материалов продолжает активно развиваться, несмотря на внешние ограничения. За шесть лет с 2017 по 2023 гг. его объем вырос в два раза, достигнув 110 млрд рублей, при среднегодовом темпе роста 10–15%. При этом уровень потребления композитов на душу населения остается крайне низким почти в 15 раз ниже, чем в других странах, что указывает на значительный потенциал для дальнейшего расширения рынка [146].

При отсутствии количественных данных по российскому рынку в открытых аналитических материалах и оценках консалтинговых агентств можно принять следующие доли сегментов, исходя из мировой практики и структуры отраслей, при оценках российского рынка инженерного ПО и ИТ-услуг в 2024 году в 34–50 млрд рублей:

- ориентировочно ПО для атомной энергетики приходится 0,5–1 % от общего рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством, что соответствует 170–500 млн рублей. Данная оценка носит ориентировочный характер и основана на пропорции атомной отрасли в мировом сегменте инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством, в частности в «Utilities»;
- ориентировочно доля ПО для анализа и моделирования композиционных материалов составляет 1,9–2,5 % от общего объема рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством, что соответствует 0,65–1,25 млрд рублей в 2024 году в зависимости от выбранного сценария общего рынка. Доля ПО для атомной отрасли в этом сегменте оценивается по аналогии с мировой практикой в пределах 4–10%, что дает ориентировочный объем рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов в атомной отрасли России около 25–125 млн рублей в 2024 году.

Стоит отметить, что приведенные оценки являются ориентировочными и служат для определения порядка величин. Они построены на допущении, что доли сегментов на российском рынке не превышают аналогичные показатели в мировом масштабе. Фактические значения могут отличаться в зависимости от развития отрасли, внедрения новых технологий и степени цифровизации российских атомных предприятий.

В части цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли также может быть выделен ряд специализированных программных продуктов (Таблица 8).

Таблица 8. Российское ПО для решения задач цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли

Разработчик	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг» СПбПУ	Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® (Подсистема CML-Bench.Composites и др.)	Отечественное ПО. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® [147] В Цифровую платформу CML-Bench® интегрированы 110 + 60 лицензий (170) САХ (ЛОГОС (Аэродинамика, Гидродинамика, Прочность, Тепло), QuantorForm, Elcut, Fidesys, FlowVision, Универсальный механизм UM, ANSYS, LS-DYNA, SIMULIA/Abaqus, HyperWoks, MSC.Software и др.)	Содержит подсистему CML-Bench.Composites на цифровой платформе по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® Включает широкие возможности по моделированию механики (линейной и нелинейной), гидро и газодинамики, электромагнетизма, управление моделью изделия из ПКМ как сборочной единицей с деталями, представляющими собой ламинаты, заполнители, клеиваемые детали, геометрические модели материалов, позволяет хранение модели с информацией об укладке в PDM и др.
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» (входит в ГК «Росатом»)	Программный пакет «ЛОГОС» (модули «ЛОГОС Прочность», «ЛОГОС Тепло» и др.)	Отечественное ПО для инженерного анализа и математического моделирования, включающее несколько модулей [148].	Содержит библиотеку моделей композиционных материалов, позволяет создавать пользовательские материалы, учитывать терморасширение и ползучесть. Реализует моделирование анизотропных материалов [148].
ООО «Национальная компьютерная корпорация» (ННК)	Сарус+ Композиты	Отечественное ПО. Модуль для проектирования композиционных материалов и изделий из них.	Позволяет формировать цифровую модель слоистой структуры композитного пакета, а также выполнять технологическую подготовку производства с высокой точностью моделирования процессов выкладки [149].
АО «Оператор ТМИК» (входит в ГК «Росатом»)	Платформа для управления данными	Отечественная платформа для управления данными [150].	Способствует объединению информации о свойствах КМ с технологиями их производства и применения в конструкциях,

Разработчик	Программный продукт	Характеристика	Специфика применения для моделирования композиционных материалов
	о свойствах материалов		в том числе для атомной отрасли [150].
Научно-технический центр «АПМ» (НТЦ «АПМ»)	Опция Composite для конечно-элементного ядра APM Structure3D	Компьютерная система инженерного анализа (CAE), опция основана на теории ламинатных пластин [151].	Применяется для расчетов оборудования АЭС и прочностного анализа объектов атомной энергетики. Опция предназначена для анализа прочности и расчета слоистых композитов [151].
ООО «ТЕСИС»	Программный продукт FlowVision	Платформа для моделирования трехмерных течений, теплопереноса и FSI (взаимодействия жидкости и конструкции) [152].	Участвует в проекте по сертификации изделий из ПКМ. Моделирование теплопереноса и FSI [152].
НОЦ «СИМПЛЕКС» МГТУ им. Н. Э. Баумана	Программный комплекс «Манипула»	Программный комплекс для полного цикла моделирования конструкций из композиционных материалов, обеспечивающий решение многомасштабных задач [153].	Включает микро- и макроанализ композиционных материалов, а также моделирование технологических процессов [153].
ООО «ФИДЕСИС»	Модуль CAE Fidesys Composite	Специализированный модуль для анализа композитных структур, интегрированный с CAE-платформой Fidesys [154].	Применяется для расчета эффективных свойств гетерогенных материалов и моделирования разрушения слоистых и тканых композиционных материалов [154].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Таким образом, несмотря на уход мировых компаний разработчиков и нарастающие с 2022 года санкционные ограничения, российский рынок инженерного ПО и ИТ-услуг, включающий решения для применения в атомной отрасли, в том числе инструменты цифрового моделирования композиционных материалов, демонстрирует последовательный рост и восстановление. Российские вендоры также предоставляют ряд программных продуктов и решений для анализа и моделирования композиционных материалов, которые могут быть адаптированы для решения специфических отраслевых задач, в частности – задач атомной отрасли.

1.3.3. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по технологиям разработки и применению композиционных материалов в России

Раздел включает примеры, связанные с использованием и разработкой композиционных материалов для атомной отрасли в России. По оценкам специалистов Композитного дивизиона ГК «Росатом» [155], к числу наиболее востребованных для атомной энергетики композиционных материалов относится углеродное волокно. Основными преимуществами указанной группы материалов являются их прочность, в т.ч. устойчивость к перепаду температур, коррозионная стойкость, магнитоинертность, и легкость [155]. На основе карбида кремния в настоящее время также разрабатываются оболочки ТВЭЛ. Кроме того, применение различных композиционных материалов изучается в рамках НИР в контексте разработки решений для утилизации ОЯТ. Ключевые кейсы в рассматриваемой отрасли в России представлены в Таблице 9.

Таблица 9. Ключевые кейсы по разработке и применению композиционных материалов в атомной отрасли в России

Кейс	Организация	Характеристика
Оболочки ТВЭЛ из карбида кремния (SiC/SiC)	АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара»; ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»	Завершение разработки и внедрение оболочек ТВЭЛ из карбида кремния (SiC) в России планируется до 2045 года, освещенное в рамках форума «Технопром-2025». Согласно планам разработчиков, внедрение карбидокремниевых ТВЭЛов позволит в будущем сократить потребность в ряде систем безопасности для АЭС, за счет чего может быть удешевлена стоимость строительства атомных энергоблоков. Также становится возможным повышение эффективности реакторов за счет увеличения выгорания ядерного топлива. По заявлениям представителей ГК «Росатом» в 2025–2030 годах в России будет создана технология изготовления прекурсоров, карбидокремниевое волокно и различных изделий на основе карбида кремния. Общее завершение разработки и внедрение карбидокремниевых тепловыделяющих элементов запланировано на перспективу до 2045 года [156]. Первые экспериментальные образцы оболочек ТВЭЛ из карбида кремния в России были созданы АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара» в 2022 году в рамках работ по созданию «толерантного топлива» [157]. По существующим оценкам, что за счет использования композиционным

Кейс	Организация	Характеристика
		материалов на основе карбида кремния КПД реакторов российских АЭС можно увеличить с 35% до 44% [158].
Углепластиковые роторы	Композитный дивизион ГК «Росатом»	ГК «Росатом» является крупнейшим производителем углепластика в стране. В мае 2015 года был введен в строй завод по производству углеродного волокна «Алабуга-Волокно», с мощностью производства более 1 400 тонн в год. В 2016 году в составе госкорпорации был выделен отдельный композитный дивизион [159]. Основное промышленное применение производимых композиционных материалов внутри атомной отрасли – создание роторов для обогащения урана. Первые разработки в данной сфере начались в период СССР, когда роторы из композиционных материалов заменили металлические, за счет чего было достигнуто значительное увеличение эффективности, благодаря высокой удельной прочности материала [160]. Из углеродного волокна изготавливаются современные роторы, опытные партии были выпущены в 2025 году топливным дивизионом ГК «Росатом» [161].
Композиционные материалы на основе алюминия с нитридом циркония	ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»	В 2025 году исследователями НИТУ МИСИС разработан способ создания композиционных материалов на основе алюминиевой матрицы и нитрида циркония. Разработанный метод позволит отказаться от сложных и дорогостоящих методов при создании изделий из композиционных материалов со сложной геометрией [162]. Ключевая задача разработки – обеспечение материалами и сквозными технологиями промышленного производства высокотехнологичных отраслей экономики, таких как атомная энергетика, теплоэнергетика и машиностроение. Новый метод производства может применяться для создания прочных деталей, работающих в условиях высоких температур и агрессивных сред [162].

Кейс	Организация	Характеристика
Композиционные материалы для термоядерной энергетики	АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»; ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»	В 2025 году специалисты НИИЭФА им. Д.В. Ефремова совместно с НИТУ МИСИС создали композиционный материал на основе вольфрама для изготовления компонентов токамака с реакторными технологиями, строительство которого планируется в г. Троицке. Разработанный композиционный материал представляет собой вольфрамовую матрицу, заполненную частицами меди. Полученный материал сочетает в себе высокую прочность и эластичность и имеет среднее между медью и вольфрамом значение теплопроводности [163].
Композиционные материалы для реакторов нового поколения	ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»	В 2018 году в ННГУ им. Н.И. Лобачевского были разработаны мелкозернистые композиционные материалы на основе граната ($Y_3Fe_5O_{12}$) с добавками высокотеплопроводящих металлов (никель, молибден, вольфрам) и карбида кремния. Созданные композиционные материалы предназначены для работы при высоких температурах и в условиях высокой радиационной нагрузки. Ожидается, что полученные материалы смогут применяться в реакторах нового поколения, а также использоваться для надежной изоляции ОЯТ от биосферы [164].
Опытно-промышленная технология изготовления филаментов из непрерывного углеродного волокна на основе термопластов	ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»	В 2024 году по заказу Композитного дивизиона ГК «Росатом», впервые в России специалисты передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ПИШ СПбПУ) разработали опытно-промышленную технологию изготовления филаментов (расходный материал в виде нити, используемый для 3D-печати) из непрерывного углеродного волокна на основе термопластов. Филамент обладает уникальными по сравнению с другими применяемыми в 3D-печати материалами физико-механическими свойствами и применяется в первую очередь в ракетно-космической и авиационной отрасли, а также в двигателестроении. Был осуществлен

Кейс	Организация	Характеристика
		запуск в промышленную эксплуатацию установки для получения непрерывно армированного филамента на суперконструкционном и высокотемпературном полимере полиэфирэфиркетоне [165]. Углепластиковый филамент, производимый за рубежом, относится к категории стратегических материалов и в Россию практически не экспортируется, установок для его производства не существовало.
Исследование режимов автоматизированной выкладки для производства экспериментальных образцов из термопластичных полимерных композиционных материалов	ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»	В 2025 году по заказу ПАО «ИЛ», АО «Аэрокомпозит», АО «ОДК» сотрудники лаборатории «Полимерные композиционные материалы» Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» исследовали влияние параметров автоматизированной выкладки (AFP) на механические свойства термопластичных композиционных материалов на основе углеродного волокна и полиамида 6 (CF-PA6). Установлено влияние температуры автоматизированной выкладки и последующей вакуумной консолидации на механические свойства получаемых образцов [166].

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Одним из наиболее значимых направлений использования композиционных материалов в атомной отрасли является изготовление компонентов роторных систем, что особенно актуально для Российской Федерации, удерживающей устойчивые лидерские позиции на глобальном рынке. В рамках научно-исследовательских работ также рассматривается применение композиционных материалов для утилизации ОЯТ. Кроме того, перспективным (потенциально прорывным) направлением НИОКР является производство ТВЭЛ с композитной оболочкой на основе карбида кремния. При этом также необходимо учитывать, что ГК «Росатом» в настоящее время занимает более 90% мирового рынка строительства АЭС и центров ядерной науки, являясь абсолютным мировым лидером.

В Российской Федерации на системной основе проводится широкий спектр экспертных, профессиональных мероприятий (конференций, форумов, выставок, научно-практических сессий), в рамках которых обсуждаются ключевые направления развития атомной отрасли, включая вопросы разработки, внедрения и промышленного применения композиционных материалов. На данных площадках рассматриваются научно-технические, конструкторские и практико-ориентированные аспекты создания и развития композитных решений для атомной техники, вопросы цифрового проектирования и аддитивных технологий, повышение надёжности и безопасности оборудования, а также перспективы использования новых материалов в реакторных установках и энергетических системах будущих поколений. Ниже представлен ряд значимых мероприятий, прошедших в 2023–2025 годах в России,

в повестку которых были включены вопросы применения композиционных материалов в атомной отрасли:

- *Научно-техническая конференция «Материалы ядерной техники (МАЯТ-2025)» – 2025 г.* Отраслевая конференция на базе АО «ВНИИНМ» (входит в Топливную компанию АО «ТВЭЛ» ГК «Росатом»), в рамках которой прошло обсуждение научных, конструкторских и технологических разработок в области материалов, топливных композиций, активных зон реакторных установок различного назначения, сверхпроводящих материалов, радиохимии (ОЯТ и РАО) и вывода из эксплуатации ЯРОО. В рамках секций был обозначен широкий спектр тем, вынесенных на обсуждение, решения, выработанные в ходе профессиональной дискуссии, направлены не только на подведение итогов, но и выявление направлений для дальнейших исследований [167].
- *Международные форумы «АТОМЭКСПО – 2024» – 2024 г.* Выставочная и деловая площадка, на которой обсуждается современное состояние атомной отрасли, формируются тренды ее дальнейшего развития. В 2024 году в рамках одного из ряда треков форумов обсуждались вопросы влияния применения новых материалов и аддитивных технологий в ключевых отраслях промышленности на конкурентоспособность конечной продукции, меры государственной поддержки, перспективы и возможности развития [168].
- *Международная специализированная выставка «Композит-Экспо 2025» – 2025 г.* Выставка является ежегодным местом встречи российских и иностранных специалистов различных отраслей промышленности, производителей, поставщиков и потребителей композитных материалов, технологий и оборудования для производства изделий, местом подведения итогов развития за прошедший год и обсуждения перспектив, а также источником новой информации для представителей отрасли. В рамках мероприятия были рассмотрены практические аспекты применения композиционных материалов и изделий из них в приоритетных секторах экономики, ряд участников представили новые технологии и образцы продукции [169].
- *Международный форум World Atomic Week («Мировая атомная неделя») – 2025 г.* Мероприятие, организованное ГК «Росатом», посвященное атомной и смежным отраслям. В рамках одного из трека программы форума подробно обсуждались вопросы применения аддитивных технологий и композиционных материалов, их возможности для атомной отрасли, текущие инновации и перспективы развития данной сферы передовых технологий [170].
- *Молодежный фестиваль «Композиты без границ» – 2025 г.* Фестиваль в рамках молодежной программы «Мировой атомной недели» является важным мероприятием, посвященным композиционным материалам. Программа фестиваля включает секции по применению композиционных материалов в различных отраслях промышленности [171].
- *Научно-практическая конференция «Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2025» – 2025 г.* Конференция на базе ФГБОУ ВО «Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева», в рамках которой рассматривались вопросы научно-исследовательской, инженерной и профессиональной деятельности в сфере ядерных технологий, внедрения результатов и практически значимых работ. В рамках мероприятия, в частности, были рассмотрены вопросы внедрения инновационных материалов в атомной отрасли, а именно – в атомную технику [172].
- *Российская научно-техническая конференция «Материалы и технологии энергетических установок» (ЛУЧ-МТ-2025) – 2025 г.* Конференция о текущем состоянии и перспективах

развития основных направлений в области материалов и технологий в энергетике. Ряд докладов конференции был посвящен обоснованию применения аддитивных технологий и материалов для объектов атомной энергетики [173].

- *Вторая научно-практическая конференция «Применение термопластичных композиционных материалов в промышленности» – 2024 г.* Передовая инженерная школа СПбПУ «Цифровой инжиниринг» выступила площадкой для взаимодействия и организации конструктивных дискуссий разработчиков термопластичных материалов, технологий и специализированного ПО, производителей оборудования по изготовлению изделий из термопластичных композиционных материалов, а также производителей самих изделий. Мероприятие посвящено технологической повестке и глобальным тенденциям в области термопластичных композиционных материалов в России, в частности в атомной отрасли [174] и др.

С учетом роли и места, занимаемых Российской Федерацией на глобальном рынке ядерной энергетики, а также перспектив использования композиционных материалов в данной области, разработка и применение передовых технологий цифрового моделирования становятся особенно актуальными. Несмотря на санкционные ограничения, нарастающие с 2022 года, и уход с российского рынка инженерного ПО ключевых мировых вендоров, рассматриваемый рынок в настоящее время находится на стадии восстановительного роста. Российские разработчики предоставляют ряд специализированных цифровых инструментов для анализа и моделирования композиционных материалов, которые могут быть адаптированы для решения задач атомной отрасли. В интересах российской атомной отрасли ведутся активные работы по созданию цифровых двойников, в т.ч. проекты внедрения цифровых двойников изделий, производственных процессов и разработки перспективных материалов.

1.3.4. Ключевые события атомной отрасли (кейсы) по применению технологий цифровых двойников в России

АО «ТВЭЛ» – головная компания Топливного дивизиона ГК «Росатом» – активно использует в своих проектах технологии цифровых двойников, что позволяет сокращать компании сроки разработки новых продуктов на 35–40%, сроки вывода продуктов на рынок – на 25–30%, а расходы на техническое обслуживание и ремонт – на 20%, еще в 2021 году [175].

В 2025 году в интересах АО «ТВЭЛ» специалисты Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» завершили проект по созданию цифровых двойников тепловыделяющих сборок (ТВС) водо-водяных ядерных реакторов – ТВС-К PWR (четырёхгранного) и ТВС ВВЭР (шестигранного). В результате на базе цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench[®] разработаны цифровые (виртуальные) испытательные стенды (ВИС) и цифровые (виртуальные) испытательные полигоны (ВИП), включающие:

- ВИП «Безопасность – ТУК», позволяющий производить оценку прочности транспортно-упаковочного контейнера (ТУК).
- ВИП «Безопасность – ОР СУЗ», позволяющий моделировать движения теплоносителя в направляющих каналах и оптимизировать конструкции гидротормоза как для прямолинейных, так и для криволинейных (искривленных) каналов в рамках системы управления и защиты (ОР СУЗ).
- Взаимосвязанные ВИС «Прочность» и ВИС «Гидродинамика», обеспечивающие оценку

напряженно-деформированного состояния изделия при статических и динамических воздействиях с учетом радиационного роста и ползучести, а также способствующие определению значений гидравлических характеристик изделия с учетом эффекта кипения рабочей среды, оптимизацию конструкции для интенсификации теплообмена.

Кроме того, для повышения интенсификации теплообмена и снижения неравномерности подогрева теплоносителя по сечению тепловыделяющих сборок выполнена многокритериальная оптимизация конструкции и расположения перемешивающих решеток по высоте ТВС [175–179].

По состоянию на 2025 год по заказу Топливного дивизиона ГК «Росатом» специалистами Частного учреждения «Наука и инновации», АО «ВНИИНМ», АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (подразделением ГК «Росатом»), АО «Прорыв», совместно с сотрудниками ряда других отраслевых предприятий завершён первый этап разработки системы виртуального радиохимического завода (ВИЗАРТ). Данный этап предусматривает формирование подходов к алгоритмам расчета на основе технической документации, описывающей все процессы производства и циклы переработки отработавшего ядерного топлива, методы обращения с радиоактивными отходами, а также требования к программному комплексу и его структуре. Программный комплекс, предназначенный для оценки, анализа и оптимизации всех этапов переработки отработавшего ядерного топлива (как на стадии разработки технологии, так и на стадии эксплуатации производства), должен выступить основой цифрового двойника радиохимического производства [180]. При этом специалисты АО «Прорыв» [181] подчеркивают, что основные элементы разрабатываемых комплексов проектируются с использованием отечественного программного обеспечения. В частности, «для сохранения связей между расчетными случаями и исходными данными (версиями частных математических моделей) в целях воспроизведения расчетов, а также навигации и просмотра расчетных данных интегральные расчетные математические модели могут быть связаны с системой управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ» ИБРАЭ РАН, построенной на базе цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®» [181]. Система «УРАНИЯ» разработана Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН) совместно с Передовой инженерной школой СПбПУ «Цифровой инжиниринг». Основная задача системы «УРАНИЯ» – максимальный перевод натурных испытаний, применяемых в атомной промышленности, в цифровую среду и повышение эффективности расчетных и экспериментальных обоснований [182,183].

Также за последние годы с применением технологии цифровых двойников в соответствии с национальным стандартом ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» на Цифровой платформе по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® был реализован ряд проектов, среди них можно выделить следующие разработки для атомной отрасли [184–186]:

- Разработка архитектуры цифрового двойника печи остекловывания высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) на базе Цифровой платформы CML-Bench® в интересах ФГУП «Производственное объединение «Маяк» (ГК «Росатом») [187]. Создание цифровой модели позволяет исследовать поведение расплава и температурные режимы в виртуальной среде, снижая риски, затраты и сроки разработки. В ходе реализации проекта была разработана мультифизическая цифровая модель малогабаритного плавителя, включающая взаимосвязанные компьютерные модели тигля, системы охлаждения, установки индукционного нагрева,

узла слива, а также модели прочности и ресурса. Модель учитывает тепловые, гидродинамические, электромагнитные и прочностные процессы. Виртуальные датчики позволяют проводить валидацию по натурным данным. Была применена технология ROM (Reduced Order Modeling, моделирование пониженного порядка) – совокупность математических и вычислительных методов, предназначенных для создания упрощенных аппроксимаций сложных, высокоразмерных систем.

- Разработка комплексной расчетной модели цифрового двойника компрессора разделитель-носублиматного комплекса (РСК) на базе Цифровой платформы CML-Bench® в интересах ООО «Центротех-Инжиниринг» (ООО «НПО «Центротех» / АО «ТВЭЛ» / ГК «Росатом»). Применение цифровых двойников позволяет более системно подходить к разработке, производству, модернизации и эксплуатации изделий, повысить их качество, надежность и отказоустойчивость [291].
- Разработка математических и компьютерных моделей подложки толкательной печи спекания и рекомендаций по снижению ее массы на базе Цифровой платформы CML-Bench® в интересах АО «Прорыв» (ГК «Росатом») [188]. В условиях отсутствия достоверных данных о свойствах материалов проведены расчеты для граничных значений диапазонов, определенных статистическими методами. Предложены 5 вариантов конструкции подложки, позволяющие в зависимости от применяемых способов обработки существующих изделий (или при изготовлении новых) снизить массу от 15% до 65%.

В связи с особым значением разработок, необходимо также обозначить основные актуальные российские проекты, фокусирующиеся на разработке цифровых двойников композиционных материалов. Так, по состоянию на конец 2024 года в Композитном дивизионе ГК «Росатом» в числе ключевых инициатив, находящихся в стадии проработки, отмечались проекты по внедрению цифровых двойников производственных процессов и разработке перспективных материалов. [189].

Среди реализуемых проектов можно назвать разработку цифровых двойников композитных оболочек для ТВЭЛ специалистами АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара» [190]. Работы по созданию топливных оболочек из композиционных материалов начаты АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара» в 2014 году. По состоянию на конец 2023 года изготовлены 55 образцов газонепроницаемых труб-оболочек 11 типов, длиной 0,5 м, отличающихся по архитектуре плетения композитного волокна, способам уплотнения каркаса и режимам осаждения SiC-матрицы и интерфазного слоя. Летом 2023 года оболочки из карбида кремния, разработанные специалистами АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара» прошли первый цикл испытаний в АО «ГНЦ НИИАР» в исследовательском реакторе БОР-60.

К 2030 году в рамках проекта должны быть созданы оптимизированные герметичные оболочки ТВЭЛов длиной до 1 м, прошедшие полный комплекс дореакторных испытаний и совместимые с ядерным топливом. Согласно заявлениям команды разработчиков ВНИИНМ, цифровой двойник технологии изготовления композиционных оболочек ТВЭЛ будет развиваться по мере проведения НИОКР по проекту в целом, а на полную готовность в создании цифрового двойника проект выйдет на этапе внедрения физической технологии в производство [190].

В Российской Федерации на регулярной основе проводится комплекс экспертных и отраслевых мероприятий (международных и всероссийских форумов, научно-практических конференций, профильных сессий, круглых столов), в рамках которых рассматриваются ключевые вопросы цифровой трансформации атомной отрасли. Существенное место в повестке данных мероприятий занимают

технологии цифровых двойников, охватывающие управление жизненным циклом объектов атомной энергетики, цифровое проектирование и системный инжиниринг, моделирование и оптимизацию сложных технологических процессов, интеграцию искусственного интеллекта и отечественного программного обеспечения, а также повышение эффективности, надёжности и безопасности атомных установок. Ниже приведён ряд значимых мероприятий, прошедших в 2023–2025 годах в России, в рамках которых обсуждались вопросы применения технологий цифровых двойников в атомной отрасли:

- *Международный форум «WORLD ATOMIC WEEK» – 2025 г.* Мероприятие, организованное ГК «Росатом», посвящено атомной и смежным отраслям. В рамках форума АО «Гринатом» выступило организатором значимой сессии «С чего начинаются технологии – с атома или с цифры?». В рамках сессии эксперты обсуждали синергию атомной отрасли и цифровых технологий, в частности неоднократно отмечались важность, практические кейсы и перспективы применения технологии цифровых двойников в атомной отрасли [191].
- *Конференция «Цифровая индустрия промышленной России – 2025» («ЦИПР – 2025») – 2025 г.* Крупное представительное деловое мероприятие в области цифровой экономики в России. В рамках ежегодной конференции «ЦИПР – 2025» представлены проекты ГК «Росатом» для достижения технологического суверенитета в области управления жизненным циклом и проектирования сложных промышленных объектов. В качестве значимых результатов в области цифровых технологий представлен разработанный с участием ИЦК «Строительство», Группы компаний «CSoft» и Группы компаний «Неолант» цифровой двойник технологической платформы для проекта «Прорыв» в атомной отрасли [192].
- *Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2025» – 2025 г.* Конференция для обсуждения будущего ядерной энергетики, обмена знаниями и опытом для молодых ученых и специалистов. В рамках конференции представлены исследования по применению технологий цифровых двойников в ядерной энергетике [193].
- *VII Всероссийский форум «Передовые цифровые и производственные технологии» – 2025 г.* Площадка на базе экосистемы технологического развития СПбПУ для системной дискуссии на актуальные темы цифровой трансформации промышленности, применения передовых цифровых и производственных технологий, проведения наукоемких НИОКР в интересах высокотехнологичных предприятий, формирования межотраслевых и кросс-рыночных консорциумов. В рамках форума в 2025 г. проведен ряд экспертных мероприятий, посвященных применению технологий цифровых двойников в атомной отрасли:
 - Дискуссия «Системный цифровой инжиниринг в атомном машиностроении» [194].
 - Круглый стол «Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной энергетике» [195].
- *Международный форум «АТОМЭКСПО – 2024» – 2024 г.* Выставочная и деловая площадка, на которой обсуждается современное состояние атомной отрасли, формируются тренды ее дальнейшего развития. В рамках форума 2024 г. состоялся бизнес-завтрак «Границы возможности использования цифровых двойников», организованный АО «ТВЭЛ» ГК «Росатом». В ходе мероприятия представители атомной, аэрокосмической и автомобильной отраслей обсудили текущее состояние, примеры применения, перспективы развития технологий цифровых двойников [196] и др.

ГЛАВА 2. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Настоящий раздел посвящен перспективам развития цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли. В частности, рассмотрены которые, в свою очередь, рассматриваются по блокам (подразделам):

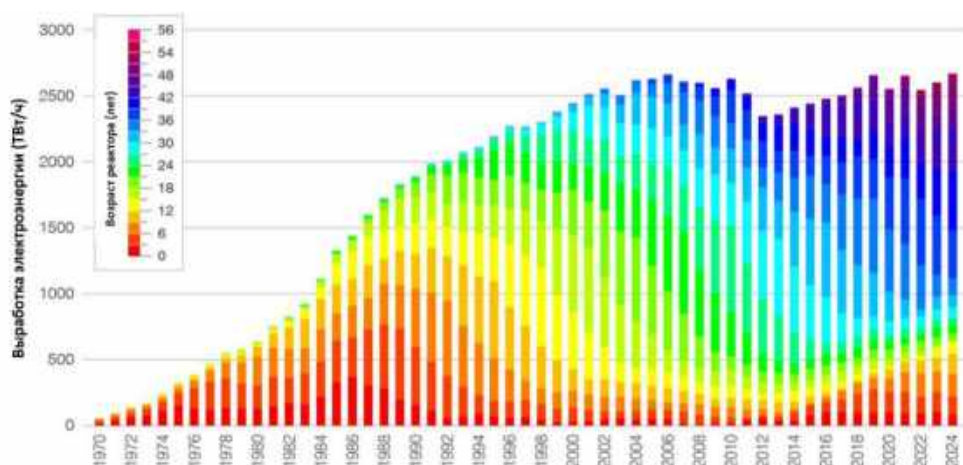
- Основные тенденции, определяющие направления развития технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли – подраздел включает обзор мировой атомной отрасли (прежде всего – ключевых технологических трендов) и рынка цифрового моделирования композиционных материалов, а также рассмотрение российской специфики указанных выше тенденций.
- Возможности для роста и барьеры развития атомной отрасли и рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов в мире.
- Возможности для роста и барьеры развития атомной отрасли и рынка технологий цифрового моделирования композиционных материалов в России.

2.1. Основные тенденции, определяющие направления развития цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли

2.1.1. Тенденции развития атомной отрасли в мире

В странах старой индустриализации (США, ЕС и страны бывшего СССР) атомная энергетика является достаточно традиционной отраслью, которая требует обновления мощностей для удержания генерации на прежнем уровне. Помимо этого, в развивающихся странах, КНР и России поднимаются вопросы об увеличении доли атомной энергетики в энергобалансе. В настоящее время в разработке находятся технологические решения, способные как заменять выбывающие атомные мощности, так и увеличивать эффективность и безопасность имеющихся (Рисунок 12).

Рисунок 12. Выработка атомной энергии на АЭС мира по возрасту реактора



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным World Nuclear Association [197], 2025

Главные тенденции в сфере атомной отрасли можно свести к нескольким направлениям. Для создания новых перспективных реакторов, модернизации и продления сроков эксплуатации существующего парка и развития новых типов ядерного топлива доминирующей тенденцией является **использование передовых производственных технологий и технологий создания цифровых двойников**.

Все страны, обладающие развитой атомной отраслью, планируют **внедрение новых реакторов**, соответствующих критериям IV поколения. В настоящее время в мире наиболее распространенными являются реакторы III поколения. Ожидается, что к 2030-м годам в мире будут активно вводиться в строй реакторы IV поколения, соответствующие требованиям улучшенной устойчивости, экономической эффективности, безопасности и надежности, а также препятствующие незаконному распространению ядерных материалов и технологий.

Другим направлением, связанным с решением **проблемы устаревания реакторного парка**, является **развитие технологий реакторов поколения III+**. Значительные усилия направляются на продление срока службы действующих энергоблоков, в том числе за счет совершенствования инструментов моделирования, контроля и наблюдения за активной зоной реактора, а также развития технологий неразрушающего контроля и радиационной защиты. На многих объектах атомной энергетики в настоящее время внедряются технологии цифровых двойников.

Важнейшим направлением развития является **замыкание ядерного топливного цикла и развитие двухкомпонентной атомной энергетики**. Это системное решение, действующее на уровне целой отрасли, должно позволить обеспечить симбиоз парка тепловых и быстрых реакторов для эффективного использования уранового топлива и минимизации радиоактивных отходов благодаря переработке и повторному использованию. Наиболее активно данное направление развивается в российской атомной энергетике. По некоторым оценкам, замыкание ядерного топливного цикла может повысить эффективность использования уранового топлива на два порядка.

Исключительную важность для атомной отрасли представляет **развитие технологий безопасности**. Начиная с 1980-х годов новые типы реакторов отличаются все большей пассивной защищенностью. После аварии на АЭС Фукусима во всем мире активизировались работы по созданию передовых видов ядерного топлива с повышенной устойчивостью к тяжелым авариям.

Внедрение передовых цифровых решений

Важным инструментом повышения безопасности и эффективности атомных реакторов, как было сказано выше, становится технология цифровых двойников. Многочисленные научные и инженерные коллективы разрабатывают решения как для промышленных, так и исследовательских атомных реакторов.

Сложность АЭС как технологической системы, высокая стоимость ее постройки, критическая важность обеспечения безопасности и значительные объемы доступных данных создают условия для реализации проектов цифровых двойников в атомной энергетике.

Как отмечают специалисты Окриджской национальной лаборатории (США) в главе «Цифровые двойники атомных электростанций и объектов», вышедшей в составе монографии «Цифровой двойник» [198], технология цифрового двойника может использоваться на многих этапах жизненного цикла АЭС, среди которых наиболее важными являются следующие:

- определение требований к площадке для строительства АЭС и выбор подходящего типа АЭС;
- выбор площадки для строительства АЭС;
- проектирование, лицензирование и ввод в эксплуатацию;
- эксплуатация АЭС, оценка безопасности на протяжении срока службы;
- вывод АЭС из эксплуатации и демонтаж станции;
- управление отработанным ядерным топливом и долгосрочное хранение отходов.

Создание и работа цифрового двойника АЭС осуществляется на основе важнейших и строго контролируемых данных, таких как:

- исходные проектные данные и данные, полученные в результате выполнения расчетов;
- данные испытаний при физическом запуске реактора;
- эксплуатационные данные, полученные благодаря датчикам;
- данные, полученные в ходе пуско-наладочных испытаний;
- данные, полученные в ходе проверок оборудования АЭС [198].

К основным возможностям, которыми может обладать цифровой двойник атомной электростанции, исследователи относят следующие:

- цифровое моделирование всех систем АЭС, включая активную зону реактора и загруженного ядерного топлива;
- интеграция данных моделирования в рабочий процесс проектирования, строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации;
- системы сбора данных с датчиков и измерительных систем, размещенных на электростанции (состояние оболочки, давление в первом и втором контурах, состояние активной зоны реактора, график технического обслуживания и пр.);
- уточнение параметров цифровой модели станции на основе данных, полученных с датчиков, для улучшения прогнозирования рабочих параметров станции.

Интегрированное мультифизическое моделирование позволяет оценить все параметры, необходимые для оценки работы ядерного реактора, что в сочетании с использованием данных, полученных с датчиков в реальном времени, позволяет предоставлять данные для эффективного мониторинга и управления активной зоной реактора [198].

В настоящее время ведутся многочисленные проекты по созданию цифровых двойников как для АЭС в целом, так и для прицельного исследования реакторов. Так, исследовательская команда из Аргоннской национальной лаборатории (США) разработала и применила новую методологию для создания цифровых двойников экспериментального атомного реактора-размножителя EBR-II и нового универсального высокотемпературного реактора gFHR. Реактор EBR-II в настоящее время выведен из эксплуатации, а цифровой двойник рассматривается как «средство валидации моделей».

Команда разработчиков в процессе создания цифрового двойника использовала графовые нейронные модели – тип ИИ-модели, в которой компоненты системы рассматриваются как различные узлы графа, а физические взаимосвязи между компонентами – как ребра. По заявлению разработчиков, цифровой двойник реактора на основе графовой нейронной сети должен облегчить всестороннее понимание динамики поведения реактора как системы.

За счет использования цифрового двойника на основе графовых нейронных сетей представители лаборатории рассчитывают создать более надежные прогнозы поведения системы, которые позволят планировать действия операторов и принимать обоснованные решения в чрезвычайных ситуациях. Вычислительные возможности цифрового двойника увеличивают потенциал поддержки работы новых типов реакторов, развивают возможности автономного управления реактором и в перспективе позволят сократить расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание [199].

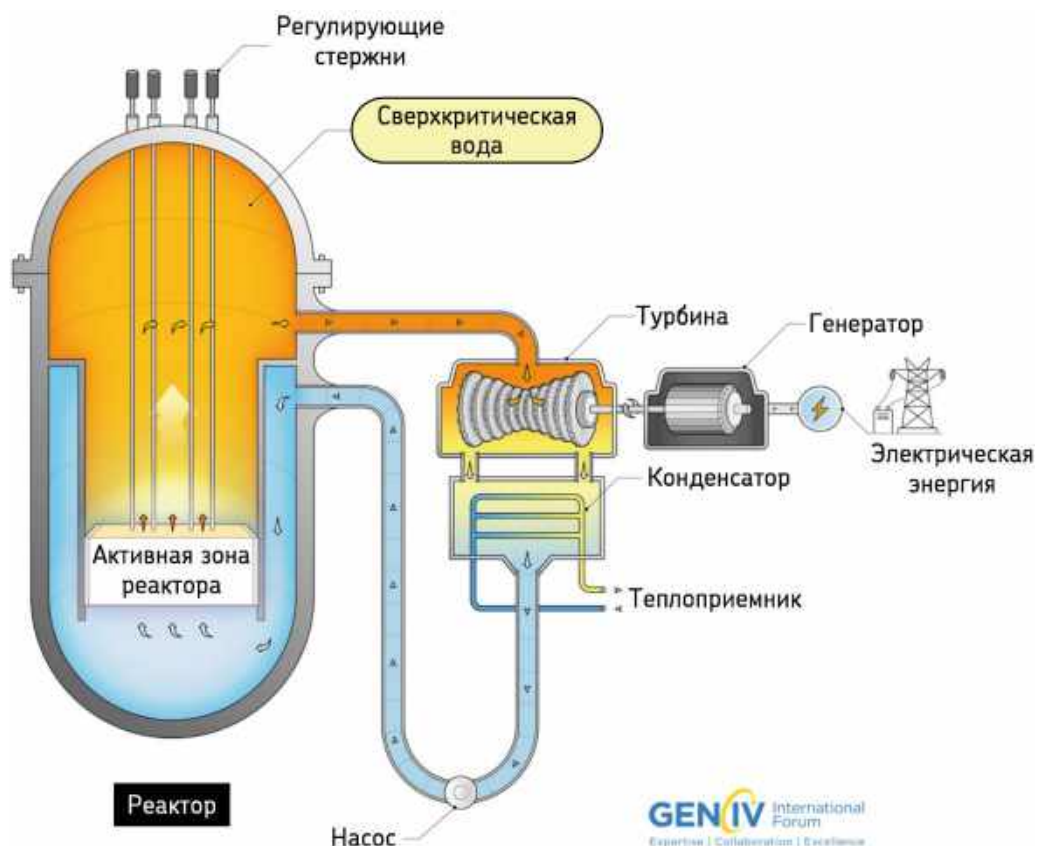
Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы

Большую часть мирового реакторного парка составляют водоохлаждаемые реакторы, на долю которых приходится более 95% промышленных атомных электростанций в мире. Благодаря долгой и успешной истории эксплуатации, водоохлаждаемые реакторы считаются наиболее надежным и эффективным техническим решением. По мере развития атомной промышленности и проведения новейших исследований и разработок становится ближе создание передовых конструкций водоохлаждаемых реакторов, способных использоваться одновременно с возобновляемыми источниками энергии. Новые достижения в сфере материаловедения, компьютерного моделирования и развитие специальных техник для обеспечения безопасности атомных электростанций способствуют совершенствованию новых водоохлаждаемых реакторов. Ключевыми направлениями в этой сфере являются развитие пассивных и активных систем безопасности АЭС, усовершенствование атомного топлива для водоохлаждаемых реакторов, разработка более эффективных методов охлаждения атомных реакторов, решения, позволяющие уменьшить производство отработанного ядерного топлива, и решения, снижающие риски несанкционированного распространения ядерных материалов [200].

В настоящее время во многих странах ведутся работы по развитию новых типов водоохлаждаемых реакторов, в том числе – реакторов со сверхкритическим водяным охлаждением теплоносителя (Supercritical water reactor, SCWR). В рамках НИОКР прорабатываются пути уменьшения размеров SCWR, увеличения их эффективности и возможности работы таких реакторов в режиме смешанного нейтронного спектра (на быстрых и тепловых нейтронах). На системном уровне ведутся исследования по технико-экономическому анализу гибридных энергетических систем, в рамках которых АЭС используется для базовой нагрузки сети, а возобновляемые источники энергии для переменной (Рисунок 13).

Важным направлением работы с существующим и перспективным парком водоохлаждаемых реакторов является применение передовых методик цифрового моделирования и создание цифровых двойников [198]. В настоящее время американским Консорциумом по передовому моделированию легководных реакторов (Light Water Reactors, LWR) на базе Окриджской национальной лаборатории развивается проект моделирования в сфере атомной энергетики – Виртуальная среда для реакторов (Virtual Environment for Reactor Applications, VERA) (Рисунок 14) [201].

Рисунок 13. Схема сверхкритического водоохлаждаемого реактора (реактора с водяным охлаждением в сверхкритическом состоянии)



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным международного форума GIF IV [202], 2025

Рисунок 14. Схема моделирования в среде VERA



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Окриджской национальной лаборатории (США) [201], 2025

Среда VERA способна решать различные вопросы производительности атомных реакторов за счет использования мультифизического моделирования. Объединение в едином пространстве моделирования переноса нейтронного и гамма-излучения, теплогидравлических расчетов, производительности ядерного топлива и химических процессов позволяет эффективно моделировать важные параметры работы ядерного реактора. Среда включает в себя компоненты, созданные на основе передовых методик численного моделирования и высокопроизводительных вычислений, а также опыта эксплуатации существующих атомных реакторов. Такая архитектура позволяет эффективно осуществлять моделирование реактора, создавать эффективные механизмы обратной связи и улучшать понимание поведения ядерных реакторов за пределами существующего отраслевого опыта [198].

Участники консорциума по моделированию легководных реакторов провели многочисленные испытания в среде VERA для задач проектирования, лицензирования и анализа срока службы компонентов АЭС. Так, для водоохлаждаемых реакторов разработки компании Westinghouse были проведены следующие типы моделирования:

- моделирование аварии регулирующих стержней реактора AP1000;
- моделирование аварии с прорывом паропровода;
- моделирование теплогидравлики с использованием вычислительной гидродинамики (CFD);
- моделирование характеристик тепловыделяющих элементов, включая образование нагара.

Среда моделирования VERA использовалась при подготовке запуска реактора на АЭС «Уоттс Бар-2» в 2016 году в США и для моделирования работы усовершенствованного реактора AP1000® на АЭС Саньмэнь и Хайян в КНР в 2018–2019 годах [198].

Малые и средние или модульные реакторы и микрореакторы

На конец 2023 года в мире в эксплуатации находились две демонстрационные атомные электростанции с малыми модульными реакторами (далее – ММР). В Российской Федерации с 2020 года работает ПАТЭС «Академик Ломоносов» с двумя реакторами КЛТ-40С мощностью 35 МВт каждый. За счет работы ПАТЭС обеспечивается подача тепла и электроэнергии в городе Певек в Чукотском автономном округе. В Китае в 2023 году была начата демонстрационная эксплуатация высокотемпературного реактора с галечным слоем с двумя реакторами с номинальной общей мощностью в 250 МВт на АЭС Шидаовань [203]. На 2023 год в мире на разных стадиях строительства находилось 3 АЭС с малыми модульными реакторами.

Разработка микрореакторов (до 20 МВт) в настоящее время ведется в Канаде, Чешской Республике, Японии, Российской Федерации, Великобритании и Соединенных Штатах Америки. Микрореакторы многими экспертами считаются потенциально перспективным решением для когенерации (одновременного производства) тепла и электроэнергии в отдаленных районах и на островах, для замещения используемых дизельных электростанций. Для микрореакторов рассматриваются различные конструкционные схемы, такие как высокотемпературные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах и реакторы с тепловыми трубами (heat pipe reactor).

Значительное внимание в мировой атомной отрасли уделяется разработке ММР для плавучих АЭС. В Республике Корея ведется разработка реактора BANDI-60, представляющего собой плавучий энергоблок на основе водо-водяного реактора с мощностью 60 МВт(э). В Российской Федерации

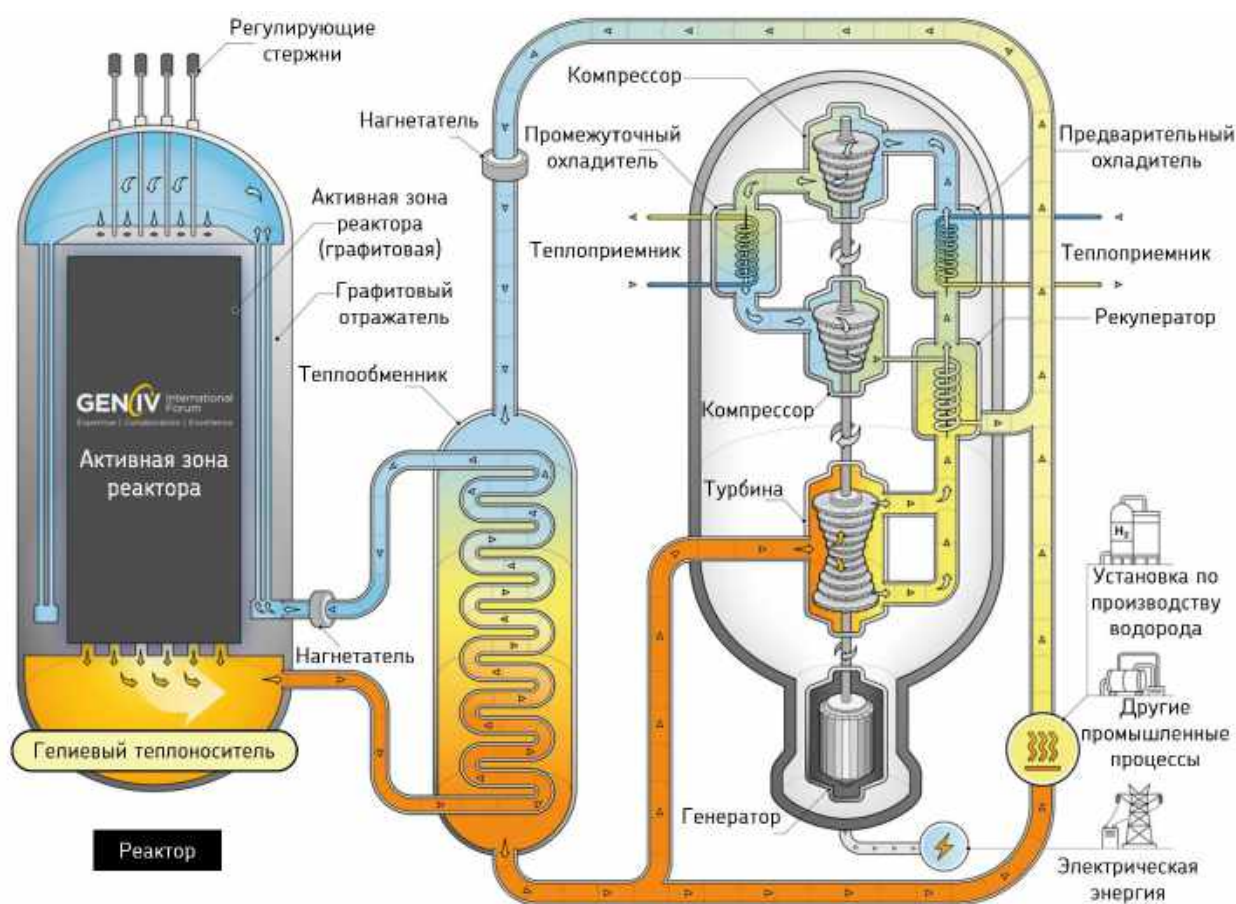
для будущего парка плавучих АЭС утвержден проект РИТМ-200М. Ожидается, что плавучие АЭС будут использоваться на нишевых рынках, включая распределенную электрогенерацию и энерго-снабжение удаленных территорий, а также будут обеспечивать опреснение воды. Для реализации этих планов в настоящее время ведется активная подготовка нормативно-правовой базы [200].

Преимущества и недостатки ММР приведены в Приложении 1.

Высокотемпературные газохлаждаемые реакторы (HTGR/VHTR)

Высокотемпературный газохлаждаемый реактор (High-Temperature Gas-Cooled Reactor, HTGR, ВГТР) представляет собой одну из наиболее развитых реакторных технологий IV поколения (Рисунок 15).

Рисунок 15. Схема высокотемпературного газохлаждаемого реактора



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным международного форума GIF IV [204], 2025

В ВГТР используется графит в качестве теплоносителя гелий, графит в качестве замедлителя нейтронов, а в качестве ядерного топлива – шарообразные (ранее – призматические) тепловыделяющие элементы с керамическим покрытием. ВГТР, способный к поддержанию стабильных высоких температур (свыше 550 °C), рассматривается как перспективное решение для теплоэнергетики, способное сократить использование ископаемого топлива для производства тепла [205].

Развитие технологий газовых реакторов имеет более чем полувековую историю – первый ВГТР

Преимущества и недостатки ВТГР приведены в Приложении 1.

Жидкосолевые реакторы или реакторы на расплавах солей (Molten Salt Reactor, MSR, ЖСР) представляют собой класс ядерных реакторов, в которых в качестве топлива, теплоносителя и/или замедлителя нейтронов используются расплавленные соли (Рисунок 16).

Установка по производству водорода

Другие промышленные процессы

Электрическая энергия

Генератор

Конденсатор

Турбина

Теплообменник

Охлаждающая соль

Аккумулятор тепла

Насос

Топливная соль

Активная зона реактора

Насосы топливной соли

Реактор

Теплоприемник

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

Такие реакторы могут работать при более низком давлении нежели водоохлаждаемые реакторы и при более высоких температурах.

В настоящее время рассматривается много вариантов конструкций жидкосолевых реакторов на разных стадиях готовности. В 2023 году в КНР в рамках работ по развитию ториевого топливного цикла запущен жидкосолевой солевой реактор TMSR-LF1 в пустыне Гоби [208,209]. Демонстрационные

жидкосольевые реакторы Hermes в США в настоящее время находятся на этапе строительства [210].
Преимущества и недостатки жидкосольевых реакторов приведены в Приложении 1.

Быстрые реакторы

В настоящее время в мире работают шесть атомных реакторов на быстрых нейтронах (три в России, два в Китае и один в Индии, японский быстрый реактор Жоуо готовится к перезапуску в 2026 году) (Таблица 10).

Таблица 10. Быстрые реакторы на этапе эксплуатации и перезапуска

Реактор	Страна	Тип быстрого реактора	Мощность	Год ввода
БН-600	Россия	Натриевый	560-600 МВт (эл)	1980
БН-800	Россия	Натриевый	789-880 МВт (эл)	2016
БОР-60	Россия	Натриевый экспериментальный	60 МВт (тепл) / 10 МВт (эл)	1969
CEFR	Китай	Натриевый экспериментальный	65 МВт (тепл) / 20 МВт (эл)	2011
CFR-600-1	Китай	Натриевый бассейнового типа	1500 МВт (тепл) / 600-650 МВт (эл)	2023
FBTR	Индия	Натриевый испытательный	40 МВт (тепл) / 13 МВт (эл)	1985
JOYO	Япония	Натриевый экспериментальный	100-140 МВт (тепл)	1978 (ожидается перезапуск в 2026 году)

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

На этапе строительства находятся пять быстрых атомных реакторов (Таблица 11).

Таблица 11. Быстрые реакторы на этапе строительства

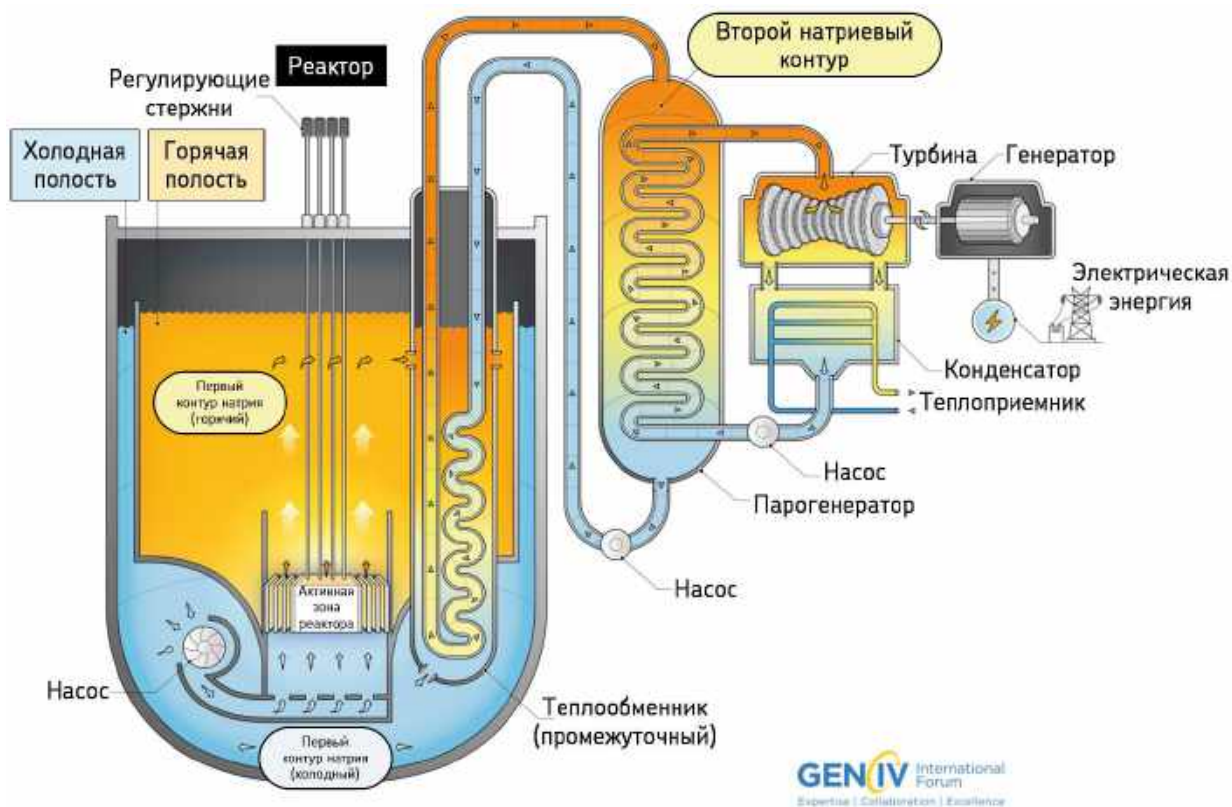
Реактор	Страна	Тип быстрого реактора	Мощность	Статус	Ожидаемый ввод
PFBR	Индия	Натриевый бассейнового типа	1250 МВт (тепл) / 500 МВт (эл)	Загрузка топлива началась в марте 2024,	2026 (сентябрь)

Реактор	Страна	Тип быстрого реактора	Мощность	Статус	Ожидаемый ввод
				на финальной стадии ввода	
CFR-600-2 (Xiapu-2)	Китай	Натриевый бассейнового типа	1500 МВт (тепл) / 600 МВт (эл)	Строительство началось в декабре 2020	~2026-2027
BN-1200M (Белоярск-5)	Россия	Натриевый модернизированный	2800 МВт (тепл) / 1220 МВт (эл)	Начало строительных работ в июле 2025	2034
BREST-OD-300	Россия	Быстрых реактор со свинцовым теплоносителем	700 МВт (тепл) / 300 МВт (эл)	В стадии строительства	~2026-2028
MBIR	Россия	Натриевый многоцелевой исследовательский	150 МВт (тепл) / 50 МВт (эл)	В стадии строительства	~2028-2029

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным открытых источников, 2025

Схема реактора на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением представлена на Рисунке 17 ниже.

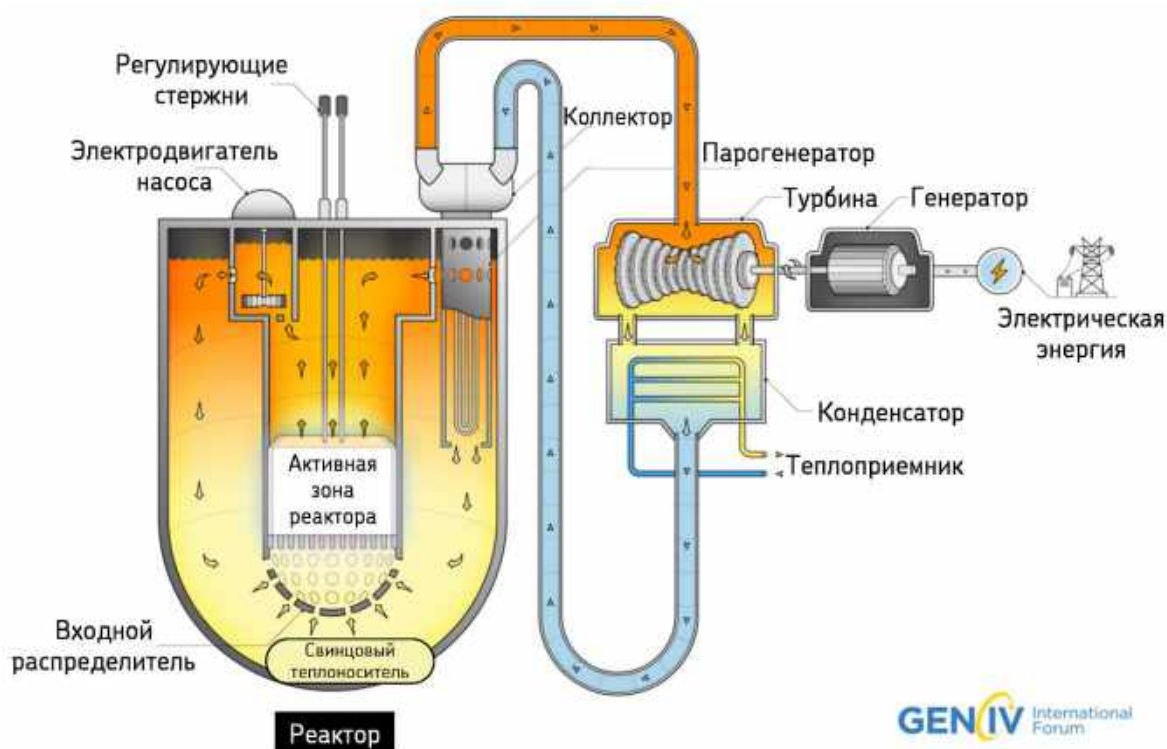
Рисунок 17. Быстрые реакторы на этапе строительства



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным международного форума GIF IV [211], 2025

Ниже также приведена схема быстрого реактора со свинцовым теплоносителем (Рисунок 18).

Рисунок 18. Схема быстрого реактора со свинцовым теплоносителем



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным международного форума GIF IV [212], 2025

В настоящее время лидирующие позиции по развитию технологий реакторов на быстрых нейтронах занимают Российская Федерация и Китай. В России работы по быстрым реакторам в первую очередь связаны с задачей замыкания ядерного топливного цикла. К типу быстрых реакторов относится половина выделенных типов перспективных реакторов нового поколения.

Активные разработки перспективных проектов реакторов на быстрых нейтронах ведутся в Соединенных Штатах Америки (реактор Sodium SFR от компании TerraPower и Versatile Test Reactor). Во Франции созданы концепты малых модульных реакторов на быстрых нейтронах.

Преимущества и недостатки быстрых реакторов приведены в Приложении 1.

Развитие ядерного топлива

Наиболее заметной сферой в атомной отрасли, в которой развитие использования композиционных материалов способно привести к системным изменениям является развитие новых видов атомного топлива, в первую очередь топлива, устойчивого к авариям (Accident Tolerant Fuel, ATF; широко распространено использование перевода «толерантное топливо»).

В настоящее время программы исследований и разработок по развитию решений в этом семействе видов топлива реализуются в значительном числе стран – таких как Бельгия, Испания, Канада, Китай, Республика Корея, Российская Федерация, США и Франция. В проектах создания толерантного топлива реализуются передовые цифровые и производственные технологии, в том числе технологии

аддитивного производства, решения на основе искусственного интеллекта и технологии автоматизации процессов производства атомного топлива [213].

Развитие толерантного ядерного топлива связано как с необходимостью обеспечить существующий парк водоохлаждаемых реакторов новым, более надежным ядерным топливом, так и с задачей создания ядерного топлива для перспективных типов реакторов, в том числе многочисленных проектов малых модульных реакторов [213].

Новые проекты ядерного топлива, разрабатываемые в рамках усилий по развитию ATF отличаются многочисленными преимуществами. Специалисты американского института ядерной энергетики (NEI) выделяют следующие потенциальные преимущества толерантного топлива:

- Улучшенные показатели безопасности во время аварий, за счет повышения устойчивости к различным механизмам отказа, а также благодаря уменьшению общего количества горючих газов, образующихся в случае гипотетических аварий.
- Улучшенная гибкость топливного цикла, за счет увеличения степени допустимого выгорания ядерного топлива.
- Улучшенные экономические показатели использования топлива за счет уменьшения размера партий загружаемого топлива и увеличения длительности циклов работы топлива, что позволит сократить объемы ОЯТ и снизить затраты на финальную стадию топливного цикла.
- Улучшенная гибкость выработки электроэнергии – более высокая надежность ядерного топлива увеличит возможности АЭС реагировать на изменяющиеся запросы в энергосистеме.
- Меньшая восприимчивость к образованию накипи и повышение устойчивости к химическим свойствам водного теплоносителя.
- Более длительное время для реагирования механических систем АЭС и операторов во время нештатных ситуаций.
- Улучшенная прочность оболочек ТВЭЛ.
- Уменьшение времени простоя во время перезагрузки топлива за счет увеличения прочностных характеристик топлива [214].

В американской программе развития перспективного ядерного топлива (Advanced Fuels Campaign), принятой в 2024 году, заявлены две группы целей для развития данного направления.

Первая группа целей – обеспечение устойчивости легководных реакторов (Light Water Reactors, LWR):

- разработка национальных испытательных стендов легководных реакторов;
- поддержка внедрения толерантного топлива;
- развитие решений, позволяющих обеспечить более высокое выгорание ядерного топлива и использование топлива с большим обогащением;
- развитие исследовательских программ, реализуемых министерством энергетики совместно с участниками отрасли.

Вторая группа целей – поддержка развития передовых ядерных реакторов:

- подготовка к аттестации (создание квалификационного базиса) референтного металлического ядерного топлива;
- подготовка к аттестации (создание квалификационного базиса) топлива TRISO;

- создания перспективного (композиционного) толерантного ядерного топлива.
- ускорение развития методологий для лицензирования в сфере топлива для перспективных ядерных реакторов [215].

В рамках работ по созданию толерантного ядерного топлива, в 2024 году американская компания Westinghouse завершила разработку топлива ADOPT (Advanced Doped Pellet Technology, «усовершенствованная технология легированных гранул»). Новое топливо должно позволить улучшить экономические характеристики топливного цикла и повысить устойчивость к авариям традиционных топливных таблеток из диоксида урана.

Ядерное топливо ADOPT представляет собой улучшенные топливные таблетки из диоксида урана, легированные небольшим количеством хрома и оксида алюминия. За счет использования оксида алюминия разработчики Westinghouse сумели значительно сократить количество поглощающего нейтроны хрома, в результате была увеличена нейтронная эффективность топливных таблеток.

Разработанное топливо может быть использовано во всех типах легководных реакторов (Light Water Reactors, LWR) и кипящих водо-водяных реакторов (Boiling Water Reactors, BWR), созданных компаниями Westinghouse и Combustion Engineering [216]. Разработка проведена в рамках первого этапа программы Westinghouse EnCore®, на первом этапе которой поставлена задача создания толерантного топлива с металлической оболочкой (циркониевый сплав), а на втором этапе должны быть созданы ТВЭЛ с оболочкой из композиционного материала на основе карбида кремния (SiC-SiC) и топливные таблетки на основе нитрида урана [217].

Упомянутое выше и используемое в ряде типов перспективных реакторов трехструктурное изотропное топливо (Tri-structural isotropic, TRISO) представляет собой малоразмерную сферу из урановых, углеродных и кислородных топливных ядер, инкапсулированных углеродом и керамическими материалами. Частицы топлива TRISO (каждая размером 0.5–1 мм) komponуются в цилиндрические или шарообразные гранулы (в публикациях для этого типа компоновки часто используется термин «галька» (pebble)) для применения в высокотемпературных газовых реакторах и реакторах на расплавах солей. TRISO-топливо способно выдерживать экстремальные температуры, значительно превышающие пороговые значения для иных видов ядерного топлива [218].

TRISO не является новой технологией – первые разработки в области сферических микротвэлов, использующих диоксид урана, велись в США и Великобритании в 1960-е годы и в ФРГ в 1980-е годы. С 2002 года указанное технологическое направление получило поддержку в ряде программ министерства энергетики США по развитию новых видов топлива для продвинутых реакторов с газовым теплоносителем [219].

На современном этапе значительная часть внимания к развитию данного вида ядерного топлива связана с появлением многочисленных компаний, продвигающих проекты передовых ММП. Так, в 2025 году компания X-Energy Reactor Company объявила о начале испытаний собственной коммерческой версии топлива TRISO-X для использования в разрабатываемом данной компанией ММП Xe-100. Испытания будут проводиться на испытательном реакторе ATR, расположенном в национальной лаборатории Айдахо [220]. Кроме того, в 2025 году компания BWX Technologies объявила об установке оборудования для производства TRISO-топлива на основе нитрида урана в рамках работ по созданию мобильного микрореактора BWXT Advanced Nuclear Reactor (BANR) [221]. Также о планах по производству TRISO-топлива на собственных мощностях в Роман-сюр-Изер заявила

французская компания Framatome [222].

В настоящее время в научных публикациях активно обсуждаются перспективы использования различных покрытий из композиционных материалов для использования в качестве материалов оболочки перспективных типов TRISO-топлива. В некоторых проектах предполагается замена графитовой матрицы TRISO-топлива на композиционный материал на основе карбида кремния [223]. Также ведутся активные исследования по перспективам использования аддитивных технологий для производства TRISO-топлива с композитными элементами [224].

2.1.2. Тенденции развития рынка цифрового моделирования в мире

Ключевые тенденции развития мирового рынка цифрового моделирования, включающего инструменты цифрового моделирования композиционных материалов, в том числе в атомной отрасли, во многом определяются более общими трендами мирового рынка инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в целом.

По оценкам CIMdata [27], мировой рынок инженерного ПО и ПО для автоматизации управления производством в настоящее время вступил в фазу структурного обновления, вызванного усложнением технологических систем, в т.ч. систем проектирования и производства, а также растущими требованиями в части устойчивого развития. Среди ключевых стратегических направлений, определяющих развитие рассматриваемой области и особенно актуальных в контексте цифрового моделирования в атомной отрасли, можно выделить императив «устойчивого развития» и «углеродной нейтральности», а также модельно-ориентированный системный инжиниринг (Model-Based Systems Engineering, MBSE) [28,29,225].

В то же время, по оценкам отраслевых экспертов [226], ключевые тенденции по итогам 2024 года включают следующие ключевые направления:

- Интеграция в рыночные решения возможностей ИИ и машинного обучения (в основном, как вспомогательные функции). В частности, отдельные компании работают над фундаментальными моделями, позволяющими делать выводы из предварительно обученных моделей. Кроме того, с распространением использования графических процессоров (GPU) для ускорения вычислений за счет параллельной обработки данных и ростом интереса к генеративному ИИ стартапы и опытные рыночные разработчики исследуют новые подходы, такие как:
 - разработка моделей на основе исторических данных моделирования и испытаний (базовое машинное обучение);
 - использование искусственного интеллекта, основанного на физике (physics-informed AI), для сокращения времени обучения моделей и требуемого объема данных;
 - применение геометрического глубокого обучения в качестве основного метода работы с трехмерными данными.
- Технологии цифровых двойников. Внедрение технологии цифровых двойников перешло от пилотных проектов к широкому развертыванию в различных отраслях промышленности. Компьютерное моделирование и анализ являются ключевыми компонентами цифровых двойников, позволяющими создавать модели для прогнозирования и операционного анализа, основанные на физических принципах. Ключевые области применения цифровых

двойников включают предиктивное техническое обслуживание и виртуальный ввод в эксплуатацию, что позволяет обеспечить обратную связь между этапами эксплуатации продукта и его проектирования [226].

Непосредственно в контексте цифрового моделирования композиционных материалов необходимо отметить также использование многоуровневых моделей для установления связей «процесс–структура–свойство», что особенно актуально для материалов, применяемых в атомной отрасли, где прогнозирование изменения свойств материалов и функциональных характеристик изделий из них под воздействием тепловых, механических и радиационных воздействий приобретает критическое значение. Программные инструменты, такие как SimuDrape (моделирование укладки композитных тканей), PAM-Forming (моделирование процессов формования), позволяют детально моделировать технологические процессы, прогнозировать вероятные дефекты и изменение волоконной структуры. Решения уровня Fibersim (платформа для проектирования композиционных материалов) или Ansys ACP (Ansys Composite PrePost) дают возможность моделировать фактическое состояние материала/изделия после изготовления, воспроизводя их характеристики с учетом реальных технологических особенностей, отклонений и дефектов [227–230].

Кроме того, отраслевые эксперты подчеркивают значение растущего спроса на облачные решения в контексте развития ПО для анализа и моделирования композиционных материалов. Облачное ПО обеспечивает масштабируемость и доступность программных инструментов, что особенно актуально для небольших компаний, а также для распределенных команд при реализации совместных проектов. Ожидается, что отмеченная тенденция будет способствовать расширению рынка в течение следующих 5-ти лет, поскольку все больше специалистов смогут использовать гибкость и экономичность облачных вычислений. При этом снижение первоначальных затрат на инфраструктуру в сочетании с упрощением совместной работы и обмена данными станут мощным стимулом для развития рассматриваемого рынка.

2.1.3. Российская специфика адаптации мировых трендов

Ключевые отличия тенденций в российской сфере цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли связаны с высокой степенью интеграции и централизации атомной отрасли, ее нацеленностью на решение государственных стратегических задач, широкими технологическими компетенциями, способностью к активному строительству АЭС «под ключ» за пределами границ России, наличием у российских участников активного опыта в проектировании и строительстве промышленных АЭС с реакторами различных типов (водо-водяных, реакторов с натриевым и свинцово-висмутовым охлаждением) и наличием малых АЭС в промышленной эксплуатации.

Вертикальная интеграция отрасли

Российскую атомную отрасль, вследствие исторических причин, отличает высокая вертикальная интеграция. Большая часть компонентов для атомных электростанций изготавливается предприятиями, входящим в состав ГК «Росатом», что выделяет российскую атомную отрасль на фоне остальных участников рынка. Другим аспектом российской атомной отрасли является тесная связь мирного и военного атома – ГК «Росатом» имеет обязательства как в области развития гражданской атомной энергетики, машиностроения и широкого спектра прочих технологий, так и в области обеспечения страны ядерными вооружениями (Таблица 12).

Таблица 12. Сравнительный анализ российской и зарубежных атомных отраслей

Параметр	Россия	КНР	США	Южная Корея	Франция
Вертикальная интеграция	Полная вертикальная интеграция	Частичная вертикальная интеграция, 2 ключевые компании (CNNC (China National Nuclear Corporation) и CGN (China General Nuclear)).	Отсутствует, на рынке помимо крупнейших корпораций присутствует множество компаний.	Высокая, государственным монополистом выступает компания KEPCO.	Частичная (EDF и Framatome).
Количество машиностроительных предприятий в составе основной компании атомной отрасли	Машиностроительный дивизион ГК «Росатом», объединяет крупнейшие отечественные энергомашиностроительные предприятия, включая производственные, проектно-конструкторские и научно-исследовательские организации (из них 7 предприятий, являются членами Союза Машиностроителей России).	В состав CNNC входят более 110 компаний, около 10% из которых являются полноценными машиностроительными предприятиями с производственными линиями.	5 дочерних компаний Westinghouse в США, Швеции и Италии.	Нет отдельного машиностроительного дивизиона, 3 предприятия входят в дочернюю компанию KEPCO NF, производящую ядерное топливо. Все важнейшее оборудование изготавливается крупнейшими машиностроительными компаниями (DOOSAN, Daewoo, Hyundai).	Несколько производственных центров, расположенных в разных странах.
Ключевые особенности	Полная интеграция отрасли	Высокая интеграция под государственным управлением с сохранением конкуренции между компаниями.	Рыночная модель без серьезного государственного контроля.	Государственный монополист разделен на функциональные подразделения.	Смешанная частно-государственная структура. Частично приватизированы предприятия по работе с ядерным топливом.

В связи с тем, что в атомной отрасли обеспечение благоприятного нормативного и политического климата является не меньшим фактором успеха, чем обладание соответствующими производственными и технологическими возможностями, высокая вертикальная интеграция и связь с государством позволяют ГК «Росатом» выстроить относительно упрощенную систему получения финансирования для строительства новых электростанций, как за рубежом, так и внутри страны. Такая архитектура отрасли служит преимуществом по сравнению с другими странами, в которых процесс согласования новых проектов и финансирования строительства новых энергоблоков может затягиваться на десятилетия, при наличии всех требуемых технологий.

В настоящее время ГК «Росатом» ведет строительство как новых реакторов поколения III+ (ВВЭР ТОИ и ВВЭР-1200), так и первых реакторов IV поколения – БРЕСТ 300 и РИТМ-200 S. Помимо России энергоблоки с реакторами IV поколения в мире на этапе строительства существуют только в КНР, многочисленные американские проекты находятся на более ранней стадии реализации.

Диверсификация ГК «Росатом»

ГК «Росатом» стремится к диверсификации собственной деятельности. В результате многочисленные машиностроительные предприятия корпорации работают на многих рынках и зачастую могут вести деятельность на высокотехнологичных рынках, находящихся вне традиционного контура атомной отрасли.

Важной спецификой российской атомной отрасли, отличающей ее от всех мировых конкурентов, является наличие в ее составе компаний, специализирующихся на разработке инженерного ПО широкого профиля. ИТ-компании корпорации отвечают как за разработку решений для цифровизации ГК «Росатом», так и за создание продуктов для других отраслей.

В 2009 году в ГК «Росатом» усилиями ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» была начата полномасштабная разработка системы инженерного анализа (CAE) в составе продукта «Логос» [231]. Первые девять лет система эксплуатировалась преимущественно для внутренних задач внутри госкорпорации, после чего в 2018 году был выведен на рынок первый продукт для внешнего потребителя – «Логос Аэро Гидро» [232]. В 2021 году была создана платформа для интеграции разработок компании и разработок других российских компаний – «Логос Платформа». В настоящее время, по заявлениям представителей ГК «Росатом», разработки компании в рамках системы «Логос» являются основой для государственной программы по импортозамещению целого класса промышленного ПО – систем математического моделирования [233]. В 2025 году система «Логос» была интегрирована с цифровой платформой по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® [234].

В контуре госкорпорации также ведется разработка средств информационного моделирования (Building Information Model, BIM) [235], средств управления технологическими и производственными процессами (SCADA и MES) [236]. В марте 2025 года ГК «Росатом» стала совладельцем 49% крупнейшего разработчика инженерного ПО – компании «Топ Системы» [237,238].

Производство композиционных материалов

Композитный дивизион ГК «Росатом» (управляющая компания – АО «Юматекс», всего в составе 21 компания) обладает полной цепочкой производства углеволокна от ПАН-прекурсоров до конечных изделий и является лидирующим российским производителем, входящим в десятку мировых

лидеров [239]. По данным Композитного дивизиона ГК «Росатом», в ходе импортозамещения за последние годы доля отечественных материалов увеличена с 10% до 90%, рынок углеволокна вырос в 3,5 раза. Продукция компании используется как в самой атомной отрасли (в частности для производства роторов), так и в авиастроении (материалы для крыла среднемагистрального самолета МС-21) [240], судостроении [241] и производстве строительных материалов [242].

Цифровое моделирование композиционных материалов для применения в атомной отрасли

В рассматриваемом контексте значимым трендом является развитие цифрового материаловедения как дисциплины [243]. Российские ученые активно используют методы квантовой химии и машинного обучения для проектирования новых материалов с заданными свойствами, что невозможно без наличия специализированного ПО. Центры компетенций, такие как ЦНТИ «Цифровое материаловедение» ФГБОУ ВУ «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», разрабатывают собственное ПО (например, PolymerAI) [243].

Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время в Российской Федерации реализуется комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства», направленная на обеспечение технологического суверенитета и научно-технологического лидерства страны за счет создания передовых технологий производства композиционных материалов и изделий из них для удовлетворения растущего спроса ключевых отраслей экономики, в т.ч. атомной отрасли [141].

Кроме того, ряд мероприятий по поддержке рассматриваемого направления предусмотрен в рамках федерального проекта «Специальные материалы и технологии атомной энергетики» [244] национального проекта технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии» [139,140].

В связи с указанными факторами (значительный рыночный потенциал, подкрепленный государственной поддержкой и реальными потребностями атомной отрасли) на период до 2030 года можно ожидать усиления следующих тенденций развития российского рынка цифрового моделирования композиционных материалов:

- создание и развитие отечественных САХ-решений и программно-технологических платформ цифровых двойников [245];
- применение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения в инженерном ПО для ускоренного проектирования новых материалов и оптимизации их свойств [243];
- внедрение технологий предиктивной аналитики для повышения срока службы изделий и конструкций.

Данные тенденции будут подкрепляться активным ростом более широкого сегмента российского рынка инженерного программного обеспечения, который ожидается в 2025–2030 годах.

Замыкание ядерного топливного цикла. Проект «Прорыв»

Реализация проекта «Прорыв» должна обеспечить российской атомной энергетике широкий набор стратегических преимуществ, а также на системном уровне решить вопрос ограниченности ресурсной базы атомной энергетики [246]. Внедрение новых АЭС с высокой естественной безопасностью

должно исключить риск тяжелых аварий. Использование переработанного ядерного топлива позволит сократить зависимость от поставок урана и сократить накопление ОЯТ. В пределе, реализация проекта должна.

В рамках проекта создается опытно-демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК), состоящий из трех главных компонентов:

- энергоблока со свинцово-висмутовым быстрым реактором IV поколения БРЕСТ-ОД-300;
- модуля фабрикации и рефабрикации для производства смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива для реакторов на быстрых нейтронах;
- модуля переработки облученного топлива.

Компактное размещение объектов ОДЭК позволит организовать «короткий топливный цикл» в пределах одной площадки, сократить логистические риски и расходы и обеспечить оперативное совершенствование технологий замкнутого топливного цикла за короткий срок [247].

Дополнительным элементом для реализации проекта является многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР), строительство которого осуществляется на базе НИИ атомных реакторов в Димитровграде [248]. МБИР должен стать крупнейшим исследовательским реактором с редкой для исследовательских реакторов тепловой мощностью в 150 МВт (электрическая мощность – 55 МВт). Уникальной особенностью МБИР должна стать возможность размещения независимых петлевых установок с разными видами теплоносителей – что позволит моделировать режим работы реакторов с натриевыми, свинцовыми, свинец-висмутовыми, газовыми и другими теплоносителями. Такая архитектура позволит производить исследования конструкционных и топливных материалов для обоснования новых концепций реакторов IV поколения [248].

Развитие малых модульных реакторов

В области развития ММР Россия отличается наличием уже построенных систем, находящихся в опытной эксплуатации. В настоящее время в поселке Певек эксплуатируется плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС «Академик Ломоносов»). На этапе строительства находится Якутская атомная станция малой мощности (АСММ) в Усть-Янском районе Якутии, ввод которой в эксплуатацию намечен на 2030 год [249]. Согласно проекту, на АСММ будут установлены два реактора РИТМ общей электрической мощностью в 110 МВт.

Именно наличие действующих современных ММР позволяет России претендовать на лидерство в указанной производственной области. Многочисленные конкурирующие американские и французские проекты реализуются небольшими стартапами, находятся на достаточно ранней стадии и зависят от относительно нестабильного коммерческого финансирования.

Наличие подобного опыта позволило включить малые АЭС и их серийное производство в стратегические планы развития российской энергетики [250].

2.2. Возможности для роста и ключевые барьеры развития в мире

2.2.1. Возможности для роста и ключевые барьеры развития атомной отрасли в мире

Согласно прогнозу Международного агентства по атомной энергии [17], рассматриваются два основных сценария развития глобальной атомной отрасли. В частности, в оптимистичном «высоком» («high») сценарии предполагается рост установленной мощности АЭС в мире к 2030 году на 18% и к 2050 году – в 2,6 раза по сравнению со значением соответствующего показателя за 2024 год. В пессимистичном «низком» («low») сценарии прогнозируется рост установленной мощности АЭС к 2030 и к 2050 году на 13% и на 32%, соответственно. При этом в «низком» сценарии предполагается сокращение доли АЭС в общем объеме мощностей на 1 п.п., а в «высоком» – аналогичный прирост (Таблица 13).

Таблица 13. Ключевые показатели развития атомной отрасли в мире в 2024-2050 годах

ПС – пессимистичный сценарий; ОС – оптимистичный сценарий

Ключевые показатели	2024	2030		2040		2050	
		ПС	ОС	ПС	ОС	ПС	ОС
Установленная мощность мировой электроэнергетики, ГВт	9581	11215	11215	14727	14727	21140	21140
Установленная мощность АЭС в мире, ГВт	377	425	445	519	710	561	992
Доля АЭС в общем объеме мощностей, %	3,9%	3,8%	4%	3,5%	4,8%	2,7%	4,7%
Производство электроэнергии в мире, млрд кВт*ч.	30529	36602	36602	46302	46302	62944	62944
Производство электроэнергии АЭС в мире, млрд кВт*ч.	2670	3095	3241	4051	5469	4534	7867
Доля АЭС в общем объеме производства электроэнергии, %	8,7%	8,5%	8,9%	8,7%	11,8%	7,2%	12,5%

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным МАГАТЭ [17], 2025

По оценкам МАГАТЭ [17], по состоянию на 2024 год два из трех ядерных реакторов находятся в эксплуатации более 30 лет, а около 40% находятся в эксплуатации более 40 лет. В рамках «высокого» сценария предполагается, что срок службы большинства ядерных реакторов будет продлен, так что к 2050 году будет выведено из эксплуатации около 81 ГВт при общем приросте установленной мощности АЭС в мире на 696 ГВт к 2050 году. «Низкий» сценарий предполагает вывод из эксплуатации 156 ГВт и, соответственно, снижение чистого прироста установленной мощности АЭС до 184 ГВт. К 2050 году в «высоком» сценарии ожидается трехкратный прирост производства электроэнергии АЭС в мире (увеличение доли атомных электростанций в общем объеме производства

электроэнергии на 4 п.п.) по сравнению с 2024 годом. В «низком» сценарии, соответственно, прирост производства электроэнергии атомными электростанциями в 2024–2050 годах составит 70%, а доля АЭС в общем объеме производства электроэнергии на 1,5 п.п. сократится [17].

Необходимо отметить, что актуальный прогноз МАГАТЭ [17] предполагает очередное (пятое по счету) повышение ключевых показателей, характеризующих развитие глобальной атомной отрасли, по сравнению с предыдущими версиями прогноза [251].

В качестве ключевых драйверов роста – факторов, способствующих реализации «высокого» сценария, эксперты Международного агентства по атомной энергии [17], отмечают благоприятный инвестиционный климат, в т.ч. рост государственной поддержки и наращивание потребностей в электроэнергии, в целом, и в атомной электроэнергии, в частности, со стороны промышленных предприятий [17]. Отдельно внимание акцентируется на решениях международных финансовых институтов – таких как Всемирный банк – поддерживать продление сроков эксплуатации АЭС, а также развитие малых модульных реакторов [251]. В то же время, необходимыми условиями успешного использования имеющихся возможностей для роста отрасли являются решение кадровых проблем и преодоление нормативно-правовых барьеров.

Специалисты Международного энергетического агентства (МЭА) в рамках Глобальной модели энергетики и климата (Global Energy and Climate Model) [252] рассматривают пять сценариев развития мировой энергетики, в т.ч. определяющих ключевые параметры развития глобальной атомной отрасли:

- Сценарий текущей политики (Current Policies Scenario, CPS), предусматривающий реализацию официально установленных и действующих законов и инициатив, но не учитывающий планируемые нормативно-правовые изменения.
- Сценарий заявленной политики (Stated Policies Scenario, STEPS), подразумевающий реализацию планируемых мер и принятие нормативно-правовых актов, подкрепленных рыночными, инфраструктурными и финансовыми условиями, но не предполагающий достижения заявленных значений целевых показателей по умолчанию.
- Сценарий ускорения внедрения экологически чистых способов приготовления пищи и услуг электроснабжения (Accelerating Clean Cooking and Electricity Services Scenario, ACCESS), определяющий путь для обеспечения всеобщего доступа к электроэнергии и экологически чистым способам приготовления пищи на базе лучших практик.
- Сценарий чистых нулевых выбросов (Net Zero Emissions, NZE), предполагающий выполнение задачи по достижению нулевого баланса выбросов к 2050 году со стороны большинства стран и организаций.
- Сценарий объявленных обязательств (Announced Pledges Scenario, APS), иллюстрирующий, в какой степени заявленные на национальном и наднациональном уровне амбиции и цели могут обеспечить сокращение выбросов, необходимое для достижения нулевых выбросов к 2050 году.

Важно отметить, что указанные сценарии позиционируются не как «прогнозные», но как определяющие рамку для дальнейших исследований. При этом в рамках отчетов за конкретный год в качестве базовых могут рассматриваться не все из них [252–254].

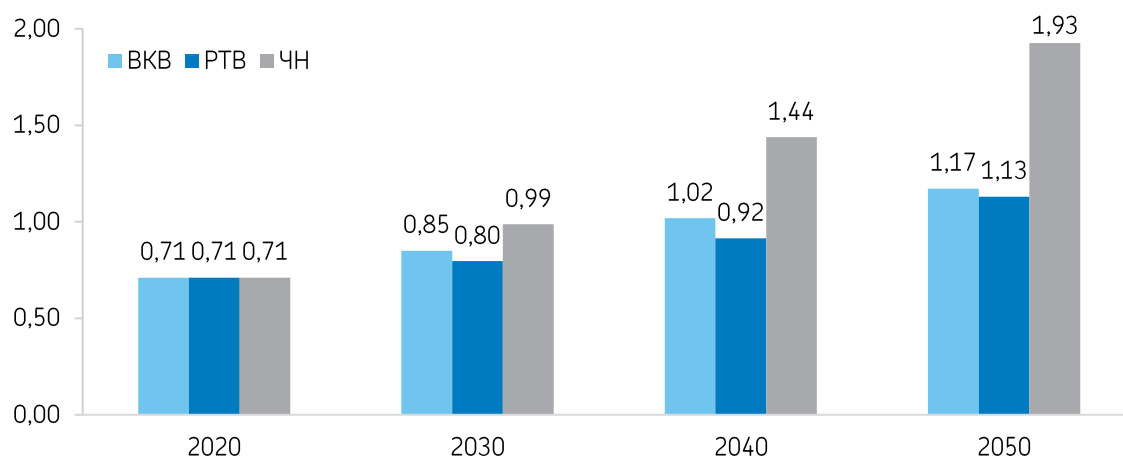
В то же время, все рассматриваемые сценарии предполагают развитие глобальной атомной отрасли

и рост инвестиций. В частности, в аналитическом отчете МЭА «Путь к новой эре атомной энергетики» (The Path to a New Era for Nuclear Energy) [255] в рамках сценария STEPS прогнозируется последовательное наращивание инвестиций в атомную отрасль до 2030 года, что приведет к росту глобальных мощностей до 650 ГВт к 2050 году. При более активном вмешательстве государства и своевременном выполнении принятых обязательств в полном объеме в рамках сценария APS объем инвестиций в атомную отрасль должен достичь 120 млрд долл. к 2030 году, что, в свою очередь, будет способствовать росту мощностей к 2050 году до 870 ГВт. При этом сценарий чистых нулевых выбросов (Net Zero Emissions, NZE) предусматривает 150 млрд долл. инвестиций к 2030 году и более 1000 ГВт установленных мощностей АЭС к 2050 году [253,255]. Необходимо отметить, что последний актуальный отчет о текущем состоянии и перспективах мировой энергетики, опубликованный в октябре 2025 года, предполагает удвоение производства атомной электроэнергии в 2024–2050 годах в рамках сценария STEPS, рассматриваемого, как наиболее реалистичный [16].

Ключевые возможности для роста глобальной атомной отрасли эксперты МЭА связывают с продлением срока службы реакторов, а также с активным распространением малых модульных реакторов. В то же время, значительную роль в развитии отрасли продолжают играть реакторы большой мощности, в т.ч. быстрые реакторы IV поколения. Сдерживающими факторами и барьерами, препятствующими развертыванию новых проектов, выступают, прежде всего, финансовые риски, связанные с высокой стоимостью атомных проектов и долгим сроком до начала возврата инвестиций. Для преодоления отмеченных барьеров и рисков необходима стабильная и последовательная государственная поддержка, в т.ч. в части обеспечения соответствующего нормативно-правового регулирования отрасли и стимулирования подготовки квалифицированных кадров [253–255].

Российское энергетическое агентство Министерства энергетики Российской Федерации (РЭА Минэнерго России) в 2024 году также представило сценарии развития мировой энергетики до 2050 года, включающие оценки развития глобальной атомной отрасли. Указанные сценарии включают три варианта: «Все как встарь» (ВКВ), «Чистый ноль» (ЧН) и «Рациональный технологический выбор» (РТВ), сформированные в контексте концепции глобального энергетического перехода, предполагающей достижение углеродной нейтральности мирового топливно-энергетического комплекса, с учетом расхождений актуальных прогнозных оценок, публикуемых различными представителями международного экспертного сообщества (в частности, экспертами Международного энергетического агентства, ОПЕК, Управления энергетической информации Минэнерго США, McKinsey и BP Energy Outlook) [256,257]. Необходимо отметить, что прогноз РЭА Минэнерго России предполагает рост атомной энергетики в каждом из трех рассматриваемых сценариев, при этом конкретные численные оценки производства электроэнергии атомными электростанциями в сценарии РТВ уступают значениям аналогичного показателя в сценарии ВКВ (около 1,13 млрд т н.э. и 1,17 млрд т н.э., соответственно), что связано, прежде всего, с финансовыми ограничениями, а именно – с достаточно высокими удельными капиталовложениями на развитие атомных мощностей. В то же время, сценарий ЧН предполагает наращивание выработки электроэнергии АЭС к 2050 году до 1,93 млрд т н. э. (Рисунок 19) [256–258].

Рисунок 19. Динамика и прогноз производства электроэнергии АЭС в 2020–2050 годах, млрд т н.э.



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным РЭА Минэнерго России [257], 2025

Развитие атомной энергетики в мировом масштабе характеризуется значительным потенциалом как низкоуглеродного источника энергии, однако его экспансия ограничивается рядом системных барьеров. К числу наиболее существенных факторов эксперты относят **высокую капиталоемкость и продолжительные сроки реализации новых проектов**. Строительство атомных электростанций требует значительных инвестиций и часто сопровождается превышением бюджета и сдвигами сроков ввода в эксплуатацию, что снижает привлекательность отрасли для частных инвесторов в условиях конкуренции с альтернативными источниками генерации. В 2024 году мировая атомная генерация достигла рекордного объема, однако обеспечение устойчивого роста требует значительного увеличения новых мощностей [259].

Конкуренция со стороны **возобновляемых источников энергии и систем накопления** создает дополнительное давление на проекты в атомной отрасли. В последние годы инвестиции в солнечную и ветровую генерацию значительно превысили вложения в новые атомные мощности, что требует от отрасли поиска способов повышения экономической эффективности и адаптации к изменяющейся рыночной среде [260].

Дополнительным препятствием является **ограниченность ресурсов ядерного топлива и инфраструктуры его обеспечения**. Прогнозируется рост спроса на уран к 2040 году, который будет опережать текущие темпы добычи. Разведка и освоение новых месторождений требуют длительных временных и финансовых затрат, что повышает риски для долгосрочной устойчивости отрасли [261].

Значимым также остаются вопросы **регуляторного и лицензионного регулирования**. Процедуры лицензирования новых объектов атомной энергетики в ряде стран характеризуются длительностью, высоким уровнем детализации требований к безопасности и эксплуатационной надежности, что создает дополнительные временные и финансовые издержки для операторов проектов.

Устаревание существующего парка реакторов оказывает дополнительное давление на отрасль. Многие действующие блоки достигли предельного проектного срока эксплуатации, что требует проведения модернизации и продления сроков службы. Эти меры увеличивают капитальные и операционные расходы и отвлекают ресурсы от строительства новых объектов, ограничивая темпы роста

генерации [262].

Системные ограничения проявляются также в **дефиците квалифицированных кадров и специализированных производственных мощностей**. Реализация сложных атомных проектов требует высококвалифицированных инженеров, технологов и операторов, а также промышленной базы для производства оборудования и компонентов с высокой точностью и соблюдением стандартов безопасности [263]. Эксперты Российского энергетического агентства в числе наиболее значимых барьеров развития атомной энергетики также называют **финансовые затраты**, необходимые для наращивания объемов производства электроэнергии АЭС. В то же время, продление срока службы действующих электростанций способствует росту отрасли [256–258].

Технологическими драйверами, обеспечивающими дальнейшее развитие отрасли могут стать развитие ММР и внедрение технологий производства водорода на базе АЭС [264–266]. ММР обеспечивают сокращение сроков строительства, унификацию и модульное производство компонентов, что повышает экономическую эффективность и ускоряет реализацию проектов. Внедрение технологий производства водорода на базе АЭС создает новые возможности для применения атомной энергии и способствует интеграции АЭС в комплексные энергетические системы.

Таким образом, совокупность барьеров – высокая капиталоемкость и длительные сроки реализации проектов, ограниченность ресурсов, регуляторные и лицензионные барьеры, устаревание существующей инфраструктуры, конкуренция со стороны возобновляемых источников энергии, а также дефицит квалифицированных кадров – формирует системный контекст, определяющий динамику развития атомной энергетики в мире.

Необходимо отметить, развитие современной ядерной энергетики обуславливает растущую потребность в новых материалах, обладающих специфическими качественными и функциональными характеристиками, включающими расширенный диапазон допустимых при эксплуатации температур, сниженный вес, повышенную радиационную стойкость, длительный срок службы и т. д. В частности, для производства ММР необходимы материалы, обеспечивающие сочетание высокой прочности и низкого веса изделий из них, для атомных реакторов IV поколения критичны повышенная стойкость к нагрузкам (механическим и термическим), коррозии и радиации. Важное значение приобретают инструменты цифрового анализа, моделирования и проектирования, позволяющие выполнять комплексные расчеты с учетом специфических требований со стороны атомной отрасли.

2.2.2. Возможности для роста и барьеры развития рынка цифрового моделирования композиционных материалов в мире

Одним из ключевых драйверов рынка, по оценкам экспертов [46,47,267], становится рост требований к качественным характеристикам материалов, используемых в отраслях промышленности. В частности, в аэрокосмической промышленности – доминирующем сегменте потребителей ПО для анализа и моделирования композиционных материалов – особенно актуальны вопросы обеспечения высоких прочностных характеристик и устойчивости деталей и элементов конструкции к воздействию внешней среды при снижении общего веса [46,47,267]. В контексте атомной отрасли значение приобретает также повышенная радиационная стойкость в сочетании с прочностью материалов, в т.ч. расширенный диапазон допустимых температур, обеспечивающий сохранение свойств указанных материалов и функций изделий и конструктивных элементов из них [3]. Высокая стоимость

ошибки наряду со строгими требованиями к безопасности и производительности обуславливают растущий спрос на высокоточные программные решения и передовые инструменты моделирования композиционных материалов [47].

Росту рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов также способствует потребность в снижении затрат и повышении экономической эффективности производственного процесса, в т.ч. сокращение цикла разработки и производства изделия. Проведение цифровых испытаний, построение цифровых (виртуальных) испытательных стендов (ВИС) и полигонов (ВИП) позволяет инженерам-проектировщикам выявлять недостатки конструкций на ранних этапах разработки и вносить коррективы в разрабатываемые материалы и изделия без создания физических прототипов, что в конечном итоге приводит к сокращению времени вывода продукции на рынок. Развитие ПО для моделирования композиционных материалов обеспечивает более высокую точность и оптимизацию проектирования, как самих материалов, так и изделий и/или конструктивных элементов из них, что дополнительно повышает эффективность производственного процесса и снижает затраты [43].

Драйверами рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов также являются рост государственных и частных инвестиций в НИР/НИОКР, связанные с разработкой новых материалов, а также расширение областей конечного применения самих разрабатываемых материалов. При этом дополнительным стимулирующим фактором выступает растущая сложность конструкций [46]. Кроме того, по оценкам международных аналитических агентств [267], расходы на НИОКР, в т.ч. на разработку продуктов и оптимизацию процессов, непосредственно ведущих компаний рассматриваемого рынка составляют свыше 10–13% годового дохода данных компаний.

В числе факторов, обеспечивающих рост рассматриваемого рынка можно также отметить ужесточение регулирования промышленного производства на уровне отдельных государств и надгосударственных образований в части обеспечения безопасности, наращивания производительности и соответствия требованиям современных экологических стандартов и нормативов в сочетании с появлением специфических отраслевых норм, регламентирующих надлежащее использование цифровых инструментов [46,47]. В то же время, недостаточная проработка отмеченных выше стандартов и норм, особенно в части определения порядка и роли цифровых испытаний в контексте сертификации изделий, отсутствие стандартизированных протоколов тестирования и валидации композиционных материалов, снижающие точность и надежность моделирования, усложняют дальнейшее расширение рынка. Кроме того различия в отраслевых требованиях затрудняют разработку универсальных инструментов [43,46].

Одним из значимых барьеров, сдерживающих рост рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов, также является **высокая сложность задач моделирования** гетерогенных композиционных материалов с различной ориентацией волокон, свойствами матрицы и слоистой структурой, в свою очередь, обуславливающая сложность используемого программного обеспечения. Для точного моделирования свойств и характеристик композиционных материалов, проявляемых в различных условиях, требуются сложные вычисления и значительные объемы данных, что создает нагрузку на вычислительные ресурсы промышленных организаций и обуславливают потребность в высокопроизводительной вычислительной инфраструктуре. Высокие первоначальные инвестиции необходимые для развертывания собственных мощностей и значительная абонентская плата за использование облачных платформ моделирования создают ограничения для выхода на

рассматриваемый рынок новых потребителей среди средних и малых предприятий.

Отдельной задачей для промышленных организаций становится **интеграция ПО в существующую информационную экосистему**. Кроме того, использование специализированного программного обеспечения требует **дополнительной подготовки и повышения квалификации сотрудников**.

К существенным вызовам и ограничениям развития рынка ПО для анализа и моделирования композиционных материалов также относятся вопросы **обеспечения информационной безопасности**, особенно актуальные в контексте работы в облачных средах, и в целом – вопросы **управления большими объемами данных** [43,46,47,267].

Возможности дальнейшего развития рассматриваемого рынка определяются сочетанием ключевых драйверов, вызовов и ограничений, а также долгосрочных, прежде всего, технологических, тенденций, позволяющих использовать указанные драйверы и преодолевать отмеченные ограничения и вызовы наиболее эффективно.

К числу ключевых возможностей, отмечаемых специалистами международных консалтинговых организаций [46], в частности, относится расширение применения облачных технологий, снижающее входные барьеры для малых и средних предприятий за счет уменьшения первоначальных затрат, а также способствующее повышению масштабируемости используемых программных решений.

Следующее направление роста связано с распространением аддитивных технологий, позволяющих оптимизировать, как композитные конструкции, так и непосредственно процесс их производства, в частности, за счет возможностей быстрого прототипирования и индивидуализации разработок. Аддитивное производство композиционных материалов, в свою очередь, обуславливает потребность и открывает возможности для использования специализированных цифровых инструментов моделирования и проектирования.

Одной из возможностей для развития рассматриваемого сегмента также является интеграция в ПО для анализа и моделирования композиционных материалов алгоритмов машинного обучения и технологий искусственного интеллекта. Кроме того, перспективным направлением в данном контексте является разработка и применение цифровых двойников изделий, предусматривающих, как создание непосредственно из цифровых моделей, так и установку двусторонних информационных связей между моделями и моделируемыми изделиями. Указанные технологии способны повысить эффективность и точность моделирования за счет автоматизации задач, в т.ч. задач анализа ретроспективных данных, а также за счет оптимизации проектируемых конструкций в режиме реального времени [43,46].

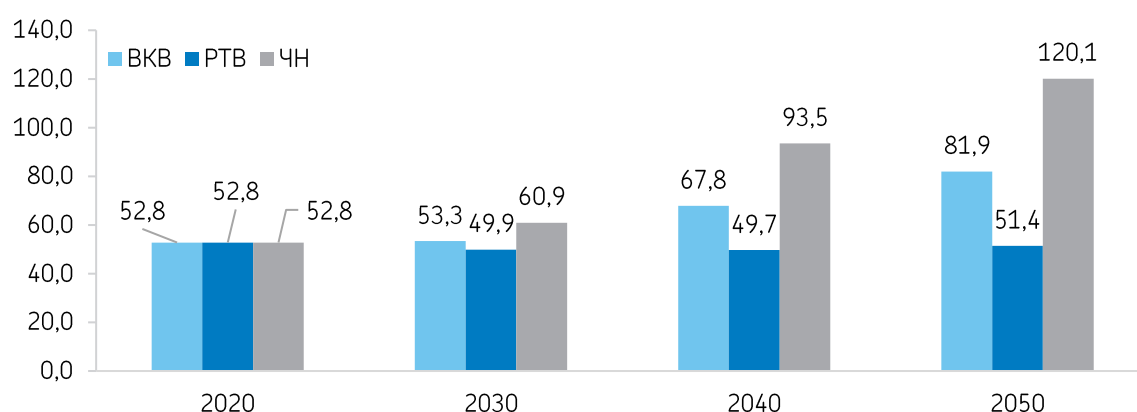
Дополнительные возможности роста рынка открывает расширение областей и сфер применения композиционных материалов, а также решаемых с их использованием задач. Так, в контексте атомной отрасли в серийном производстве компонентов для оборудования используются углеродные композиционные материалы. Радиационно-защитные ПКМ могут применяться при создании легких экранов и средств персональной защиты [5]. Перспективным направлением также считается использование композиционных материалов при создании оболочек ТВЭЛ и элементов, работающих при высоких температурах и больших нагрузках [6]. Кроме того, дополнительной областью применения композиционных материалов в атомной отрасли может стать разработка и производство решений для утилизации ОЯТ.

2.3. Возможности для роста и ключевые барьеры в России

2.3.1. Возможности для роста и ключевые барьеры развития атомной отрасли в России

Российское энергетическое агентство Министерства энергетики Российской Федерации в рамках упомянутого выше отчета «Сценарии развития мировой энергетики до 2050 года» [256,257] прогнозирует рост российской атомной отрасли во всех рассматриваемых сценариях. Для России в данном контексте, как и для мира в целом, характерно отсутствие однозначной тенденции (Рисунок 20).

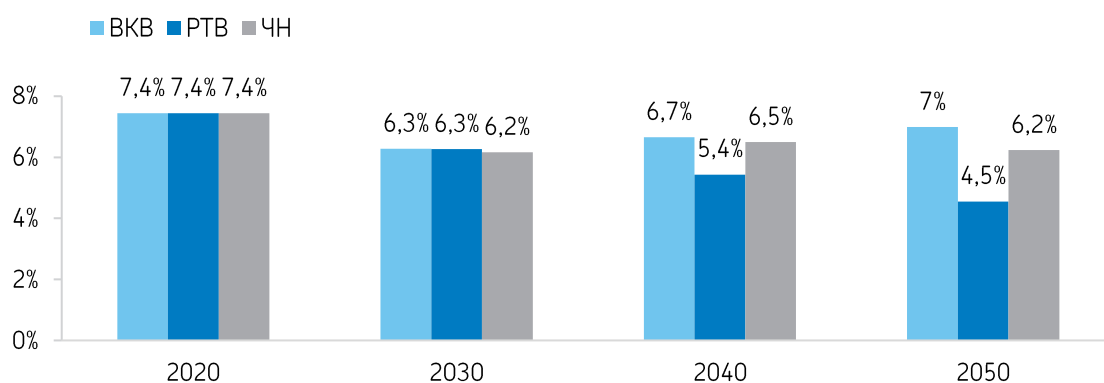
Рисунок 20. Динамика и прогноз производства электроэнергии АЭС в России в 2020–2050 годах, млн тнэ



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным РЭА Минэнерго России [257], 2025

В частности, сценарий «Все как встарь» (ВКВ), предполагающий сохранение текущего положения и наращивание использования ископаемых источников энергии в перспективе до 2050 года, предусматривает рост производства электроэнергии атомными электростанциями до 81,9 млн тнэ к 2050 году и сохранение доли России в глобальном производстве электроэнергии АЭС на уровне 6–7% (Рисунок 21).

Рисунок 21. Динамика и прогноз доли России в глобальном производстве электроэнергии АЭС в 2020–2050 годах, %

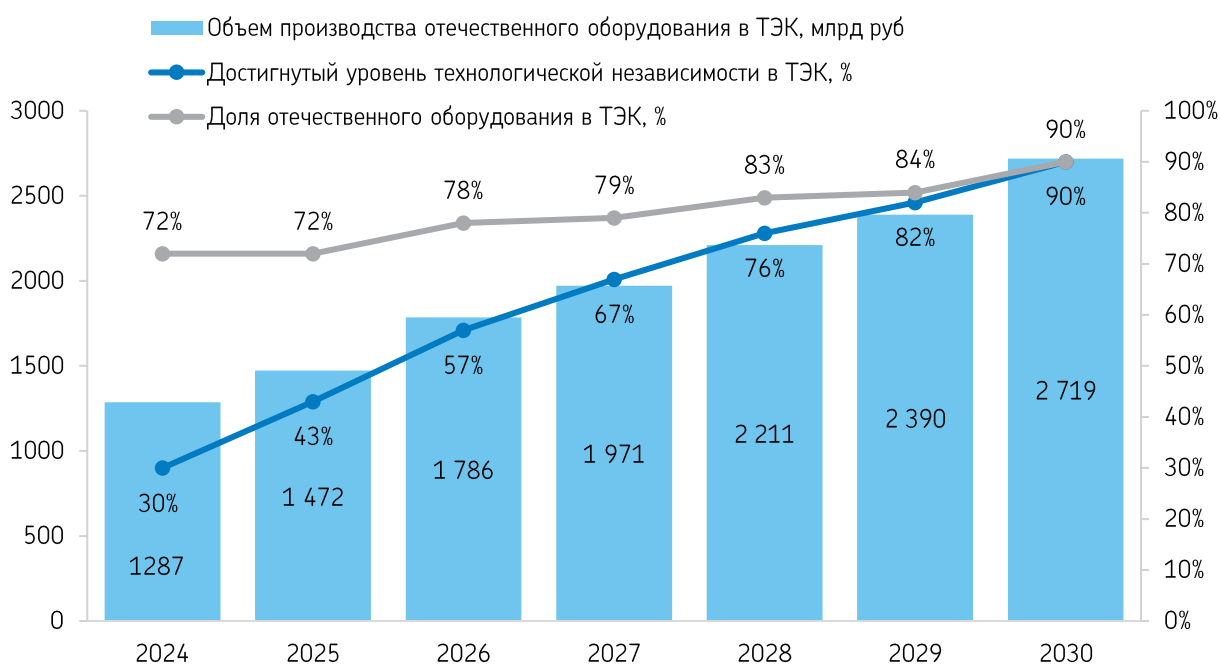


Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным РЭА Минэнерго России [257], 2025

В то же время, в базовом, наиболее вероятном, сценарии «Рациональный технологический выбор» (РТВ), предполагающем баланс между целями Парижского соглашения в части допустимого использования углеводородов и доступным объемом глобальных инвестиций на развитие альтернативной энергетики, объем производства электроэнергии атомными электростанциями в 2050 году прогнозируется на уровне 51,4 млн т н.э., а доля России в глобальном объеме производства – на уровне 4,5%. При этом сценарий «Чистый ноль» (ЧН), соответствующий достижению целей по углеродной нейтральности мировой экономики, предполагает достижение к 2050 году производства электроэнергии атомными электростанциями на уровне 120,1 млн т н.э. при доле России в глобальном объеме производства на уровне 6,2% [256,257].

Необходимо отдельно подчеркнуть, что в 2025 году стартовал национальный проект технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии» [139,140], направленный на обеспечение мирового лидерства Российской Федерации в атомных технологиях и технологического суверенитета в новых энергетических технологиях, а также предусматривающий достижение к 2030 году ряда ключевых показателей – индикаторов целевого состояния. При этом особенно актуальными в рассматриваемом контексте становятся показатели, характеризующие степень технологической независимости атомной и, в целом – топливно-энергетической, промышленности [139,140]. В частности, планируется нарастить объем производства отечественного оборудования в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации в 2024–2030 годах более чем в 2 раза и обеспечить технологическую независимость ТЭК и долю отечественного оборудования в данной отрасли на уровне 90% (Рисунок 22).

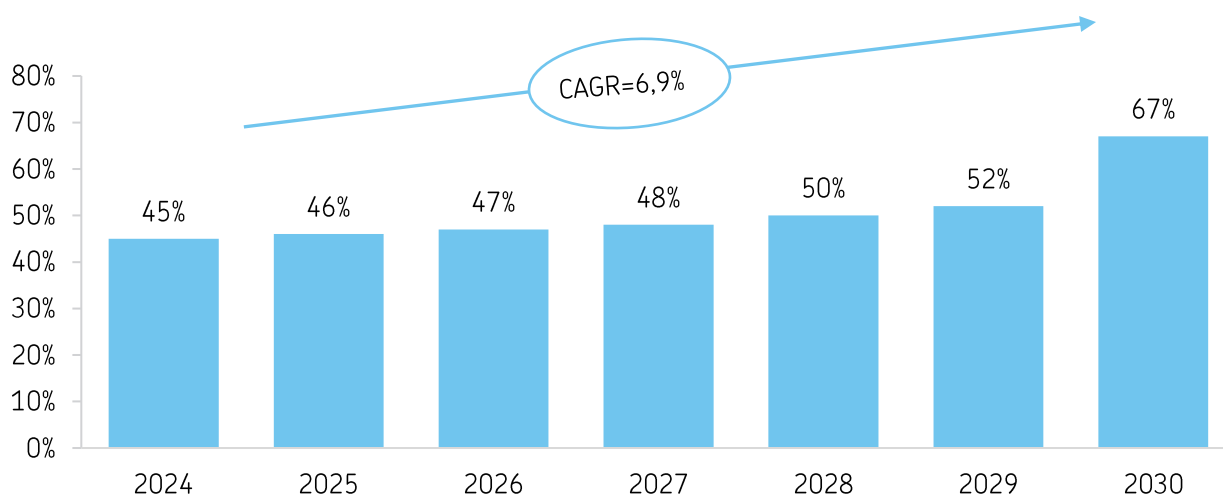
Рисунок 22. Динамика ключевых показателей, характеризующих технологическую независимость российского ТЭК, согласно Единому плану по достижению национальных целей развития Российской Федерации в 2024–2030 годах



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Единого плана по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года [268], 2025

При этом в части технологической независимости непосредственно в области создания новых атомных технологий планируется обеспечить к 2030 году значение указанного показателя на уровне 67% (Рисунок 23).

Рисунок 23. Динамика достигнутого уровня технологической независимости в области создания новых атомных технологий, согласно Единому плану по достижению национальных целей развития Российской Федерации в 2024–2030 годах, %



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по данным Единого плана по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года [268], 2025

В то же время, планируется расширить число стран глобального присутствия России на международном рынке атомных и смежных технологий в 2024–2030 годах с 62 до 75 [139,140,268].

Значимым барьером, препятствующими развитию российской атомной отрасли, на современном этапе остается сохраняющаяся **зависимость отечественного топливно-энергетического комплекса от импортных технологий при нарастающем санкционном давлении**, дефицит технологий и высокотехнологичной продукции на внутреннем рынке [269].

Важной задачей является также преодоление **кадрового дефицита** [269,270]. По оценкам представителей Ядерного общества России, потребность ГК «Росатом» в молодых квалифицированных сотрудниках в два раза превышает текущий объем подготовки высших образовательных учреждений [270].

К числу существенных вызовов относится **поиск путей финансирования и фондирование проектов по строительству АЭС**, как на территории России, так и за рубежом. Как отмечено выше, Российская Федерация сохраняет ведущие позиции в производстве атомных реакторов, оставаясь ключевым мировым экспортером [133], в то время как ГК «Росатом» лидирует по величине портфеля заказов на сооружение АЭС, занимая более 90% глобального рынка строительства АЭС и центров ядерной науки [134]. Объективной причиной финансовых рисков и соответствующего роста необходимых затрат для запуска новых проектов в атомной отрасли, при этом, являются, в частности, **длительные сроки реализации**.

Кроме того, необходимо отдельно отметить сложную геополитическую ситуацию, в т.ч. сохраняющуюся напряженность между странами, обострение ряда региональных конфликтов и общий рост неопределенности при одновременном ужесточении конкуренции на глобальном рынке [269,271].

Возможности роста отрасли связаны, прежде всего, с преодолением обозначенных выше барьеров, вызовов и задач, как за счет наработанной базы, так и за счет новых технологических решений. В частности, национальный проект технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии» [139,140], включает такие инициативы как:

- Федеральный проект «Новая атомная энергетика», мероприятия которого направлены на разработку технологий замкнутого ядерного топливного цикла и энергоблоков нового поколения [272].
- Федеральный проект «Экспериментально-стендовая база для разработки технологий двух-компонентной атомной энергетике», в рамках которого разрабатывается обоснование безопасности решений новой атомной энергетике [273].
- Федеральный проект «Специальные материалы и технологии атомной энергетике», посвященный развитию материаловедческой базы будущей атомной энергетике, в т.ч. направленный на решение вопросов, связанных с переработкой высокоактивных отходов [244].
- Федеральный проект «Технологии термоядерной энергетике», мероприятия которого направлены, в частности, создание технологий для получения экологически чистого источника энергии будущего [274].
- Федеральный проект «Серийная референтность атомных электростанций большой и малой мощности», сфокусированный на создании и выпуске блоков АЭС, в т.ч. быстрых реакторов IV поколения и малых модульных реакторов [275].

Особое внимание в рамках реализации национального проекта, при этом, уделяется подготовке и переподготовке специалистов, работающих с новыми атомными технологиями [139,140].

В рассматриваемом контексте необходимо отметить, что разработка новых материалов и соответствующих технологий является сквозным направлением, результаты которого составляют базис электроэнергетики и необходимы для обеспечения развития атомной отрасли в целом. В частности, атомные реакторы IV поколения, отличающиеся повышенными требованиями к безопасности, надежности и экономической эффективности производства и эксплуатации, обуславливают соответствующий запрос на используемые материалы и конструкции, особенно в части устойчивости к воздействию давления, температур, механических нагрузок, а также коррозионной и радиационной стойкости. Малые модульные реакторы, в свою очередь, нуждаются в материалах, сочетающих с повышенной прочностью низкий вес конечных изделий.

В данной связи, возрастает потребность в передовых технологиях и инструментах цифрового проектирования и моделирования, позволяющих разрабатывать материалы и конструкции из них под решение конкретных отраслевых задач при обеспечении экономической эффективности процессов разработки и производства.

2.3.2. Возможности для роста и барьеры развития рынка цифрового моделирования композиционных материалов в России

Технологическими драйверами рынка инженерного ПО после 2025 года, при этом, станут развитие систем управления данными по продуктам (PDM, PLM), технологии информационного моделирования и сред общих данных для инженерных сооружений и строительства, а также интеграция функционала искусственного интеллекта, автоматизация проектирования и моделирования [276].

Ключевые барьеры, препятствующие развитию рынка, связаны с недостаточной зрелостью отечественных продуктов, сравнительно невысоким уровнем цифровизации промышленного сектора, а также требованиями со стороны Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК России) и Федеральной службы безопасности Российской Федерации (ФСБ России). В частности, согласно исследованию Московского физико-технического института (МФТИ), SK Capital и группы ОМЗ «Перспективные технологии», уровень цифровизации российских промышленных предприятий в целом оценивается в 25–30%, при этом сохраняется значительная доля ручных операций и устаревшего программного обеспечения. Отраслевые эксперты подчеркивают, что переход к актуальным отечественным решениям требует времени и инвестиций, однако недостаточная зрелость российского промышленного программного обеспечения обуславливает необходимость со стороны организаций-пользователей дорабатывать ПО под себя, что, в свою очередь, увеличивает затраты. Сдерживающими факторами выступают также высокая ключевая ставка и ожидания возвращения западных вендоров [277,278].

Необходимо отметить, что на основании открытых данных ввиду узкой специфики рассматриваемой ниши определение точных количественных прогнозных оценок объема рынка ПО для моделирования композиционных материалов в контексте атомной отрасли не представляется возможным. Тем не менее, можно выделить ключевые факторы, стимулирующие развитие рассматриваемого рынка, а также определить ряд соответствующих качественных характеристик.

В частности, российская атомная отрасль отличается высокой цифровой и технологической зрелостью, что снижает актуальность части отмеченных выше барьеров и вызовов, замедляющих развитие более широкого сегмента российского рынка инженерного программного обеспечения. Кроме того, для ГК «Росатом» характерно активное внедрение и разработка собственных передовых решений, учитывающих глобальные технологические тренды. Так, например, внедрение ИИ для моделирования производственных процессов и сокращения количества рутинных операций, цифровых двойников производственных процессов и разработки перспективных материалов позволит не только ускорить процессы разработки, но и снизить издержки на производство [279]. Подобные проекты АО «ТВЭЛ» ГК «Росатом» в настоящее время находятся на стадии проработки.

Драйвером развития российского рынка цифрового моделирования композиционных материалов в контексте атомной отрасли также является курс на технологический суверенитет и лидерство, реализуемый в соответствии с Концепцией технологического развития до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р [280], Федеральным законом от 28.12.2024 № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [281] и другими государственными документами (например, Постановление Правительства Российской Федерации № 2478 от 28.12.2022 г.) с целью достижения национального контроля над критическими

технологиями. Развитие правовой базы включает также внедрение национальных стандартов, таких как ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [96], ГОСТ Р 57700.42–2023 «Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Общие положения» [282] и т. д., что создает нормативно-техническую основу для расширения применения компьютерного моделирования, в т.ч. в атомной отрасли [283]. Фокус на импортозамещении стимулирует создание отечественных аналогов ПО в условиях нарастающего санкционного давления. Кроме того, на стимулирование рассматриваемого сегмента направлены мероприятия в рамках национального проекта технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии» [139,140], в частности, федерального проекта «Специальные материалы и технологии атомной энергетики» [244], а также комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства» [141].

Как отмечено выше, ГК «Росатом» выступает интегратором и одним из основных потребителей технологий, связанных с проектированием композиционных материалов, а также конструкций и изделий из них. В рамках Композитного дивизиона развивает собственный Научно-исследовательский центр (НИЦ), который ведет работы по созданию полного технологического цикла, при этом дивизион развивает проекты по созданию конечных изделий для таких отраслей, как атомная промышленность, энергетика в целом, авиационная и космическая промышленность, автомобилестроение, строительство и даже спортивная индустрия [279]. Атомная отрасль, при этом, нуждается в композиционных материалах с уникальными свойствами, например, с близким к нулю коэффициентом термического расширения и высокой теплопроводностью для космических применений [243,284]. В то же время, практической задачей Композитного дивизиона ГК «Росатом» является масштабирование бизнеса.

В целом, можно ожидать активное развитие российского рынка цифрового моделирования композиционных материалов на фоне усилий государства по импортозамещению критически важного программного обеспечения. Участие крупных компаний, в том числе ГК «Росатом» усилит данный процесс. Вместе с тем, отдельные вопросы функционирования более широкого сегмента российского рынка инженерного программного обеспечения и программного обеспечения для автоматизации управления производством, включая вопросы неполноты функционала отечественных решений и вопросы унаследованных систем (legacy software) на российских предприятиях еще ждут своего решения.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что перспективы разработки новых изделий из композиционных материалов для атомной отрасли и развития средств цифрового моделирования таких изделий поддерживаются наиболее важными тенденциями в атомной отрасли – стремлением к обеспечению безопасности и улучшению экономической эффективности атомной энергетики.

Именно использование композиционных материалов с применением методов их цифрового моделирования может обеспечить создание революционных видов толерантного (устойчивого к авариям) ядерного топлива, которое способно не только кардинально улучшить безопасность наиболее распространенных в мире АЭС, использующих водоохлаждаемые реакторы (ВВЭР и PWR), но и стать основной для создания реакторов нового поколения, отличающихся как высокой безопасностью, так и лучшей эффективностью. Развитие ряда экспериментальных реакторов, использующих TRISO-топливо, также может получить дополнительный импульс, когда станет доступным серийное

производство шарообразных тепловыделяющих элементов, использующих оболочку из композиционных материалов.

Необходимость развития всей цепочки создания стоимости в атомной отрасли, от производства оборудования для производства ядерного топлива до производства защитных элементов на атомной станции увеличивают спрос на решения для работы и с ПКМ.

Активное развитие новых прорывных типов реакторов ставит перед отраслью задачу широкого применения технологии цифровых двойников как для снижения затрат на этапе проектирования и строительства, так и для обеспечения эффективной эксплуатации атомных электростанций, предиктивного обслуживания оборудования и обеспечения безопасности на необходимом уровне.

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ, УСТАЛОСТИ, ПОЛЗУЧЕСТИ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Настоящий раздел посвящен анализу технологий моделирования полимерных композиционных материалов (далее – ПКМ) с учетом технологий изготовления, остаточной прочности, усталости, ползучести и трещинообразования для атомной отрасли, включая анализ методик моделирования процесса изготовления ПКМ в части кинетики полимеризации для создания высокоадекватных математических моделей композиционных материалов.

Атомная отрасль динамично развивается в мире. В США ведутся работы по продлению срока эксплуатации действующих реакторов до 80 лет, планы по продлению срока службы реакторов есть также у Канады, Венгрии, Швеции, Румынии, ЮАР, Южной Кореи и Великобритании [285]. В Великобритании также реализуются планы строительства крупных реакторов [286–288], а в Канаде продвигается разработка реакторов малой и средней мощности (SMR) [289]. Россия, Китай и Южная Корея активно продвигают экспорт атомных электростанций. Япония в 7-м Стратегическом энергетическом плане, опубликованном в феврале 2025 года, представила политику замены существующих ядерных реакторов усовершенствованными реакторами следующего поколения с целью содействия использованию ядерной энергетики в качестве источника декарбонизированной энергии [290].

В настоящее время перед нашей страной и промышленностью стоят актуальные задачи по достижению технологического суверенитета и технологического лидерства – превосходства технологий и (или) продукции по основным параметрам (функциональным, техническим, стоимостным) над зарубежными аналогами [291]. В России реализуется ряд инициатив, направленных на реализацию технологического суверенитета и лидерства в атомной отрасли, с опорой на Федеральный проект «Специальные материалы и технологии атомной энергетики с опережающей подготовкой квалифицированных кадров по направлению новые атомные технологии» [292], Стратегию развития ядерной энергетики РФ на период до 2050 г. и перспективу до 2100 г. (одобрена Президиумом НТС ГК «Росатом» в декабре 2018 г.) и другие.

В атомной отрасли традиционно существует высокий уровень требований к безопасности, среди требований к материалам особое значение приобретают долговечность, устойчивость к радиации и термальному циклированию, что ставит перед ПКМ особые задачи. Моделирование поведения таких материалов становится необходимым инструментом для оценки надежности и прогнозирования ресурса эксплуатации. Решение задач по выработке оптимальных технологий моделирования материалов, в частности ПКМ с учетом технологий изготовления для атомной отрасли необходимо для достижения задач и целей стоящих перед отраслью и страной.

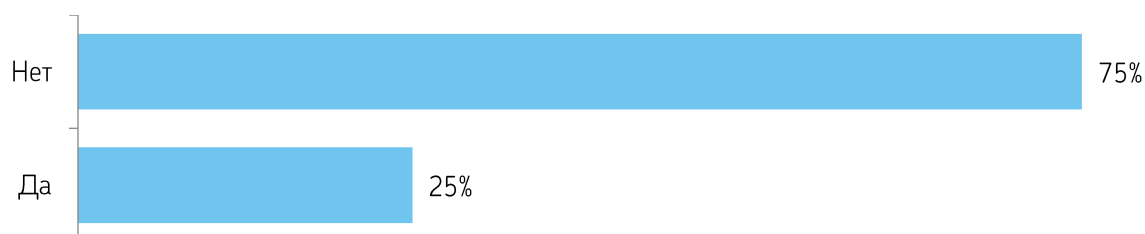
3.1. Методы цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли

Методы цифрового моделирования в атомной отрасли традиционно развиты и широко применяются по причине высокой стоимости объектов, а также в связи с существующими ядерными и

радиационными рисками при их эксплуатации и крайне высокой ценой возможной ошибки. Применяются различные подходы к моделированию – информационное, 3D- и 4D-, расчетное и другие, а ряд режимов работы объектов атомной энергии, прежде всего аварийных, исследуется и обосновывается расчетными методами [293].

По результатам проведенного Инфраструктурным центром «Технет» опроса, большинство из опрошенных респондентов не использует специализированное ПО для проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов. Распределение полученных ответов представлено на Рисунке 24.

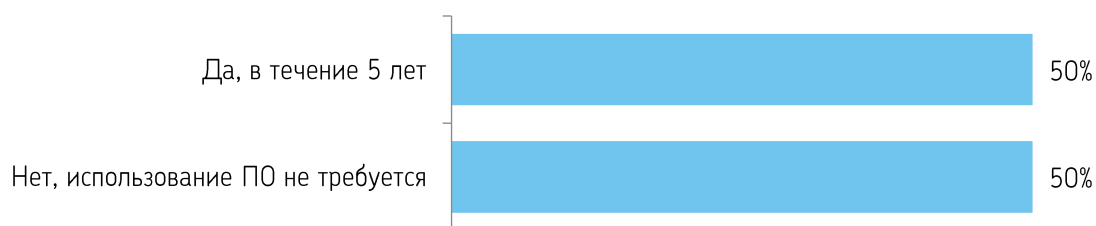
Рисунок 24. Структура ответов об использовании специализированного ПО для проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов в организациях, прошедших опрос, % оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса

Однако респонденты отметили планы по использованию специализированного ПО в ближайшие годы. Распределение полученных ответов представлено на Рисунке 25.

Рисунок 25. Структура ответов о планах по использованию специализированного ПО для проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов в организациях, прошедшей опрос, в ближайшие годы, % оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса

Разработка и изучение новых материалов играет важную роль в развитии атомной отрасли. Среди факторов, которые важно учитывать, можно выделить: влияние радиационного облучения на механические свойства сталей, сплавов и композиционных материалов (диаграмму деформирования, модуль упругости, предел текучести, предел прочности, ползучесть и длительную прочность), радиационное распухание и влияние вида напряженного состояния на ползучесть и длительную прочность материалов в условиях радиационного облучения. Эти эффекты важно учитывать при построении моделей деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях радиационного облучения.

Исследования особенностей воздействия радиационных сред на материалы конструкций в России ведется начиная со времени широкого использования ядерных установок (исследования радиационной стойкости материалов, влияния радиации на кинетику и изменение механических характеристик). Этим исследованиям посвящены труды отечественных ученых Комаровского А.Д., Бродера Д.П., Логунова В.Н., Конобеевского С.Т. и др., среди более современных можно отметить работы Амаева А.Д., Второва Б.Б., Гусева Н.Г., Дубровского А.В., Дубровского В.Б., Кисилевского В.Н., Климанова В.А., Штромбаха А.Д. и др. [294], этими вопросами занимались такие зарубежные ученые как Прайс Б., Кларк М., Роквелл З. и многие другие.

Важное значение для атомной энергетики, благодаря своим исключительным свойствам, имеют керамические материалы. Ключевые параметры их применимости включают **радиационную стойкость** к различным видам ионизирующих излучений и **термическую стабильность** радиационных дефектов после облучения. В свою очередь, процессы дефектообразования, концентрация напряжений и искажений в кристаллической структуре, аморфизация и фазовые превращения под воздействием облучения – все эти факторы определяют свойства облученных материалов [295–299]. Одним из методов управления аморфизацией и увеличением концентрации дефектов выступает пострadiационный отжиг, основной целью которого является снижение остаточных напряжений и искажений в структуре путем аннигиляции дефектов. При этом необходимо отметить, что физическая природа и механизмы этих процессов остаются на стадии разработки, несмотря на большое количество исследований в области дефектообразования и пострadiационного отжига [300–307]. Получение новых данных о влиянии облучения на структурные свойства конструкционных материалов имеет важное практическое значение, что позволит прогнозировать области применения и сроки службы этих материалов в различных областях.

Другой важной проблемой выступает увеличение риска высокотемпературного гелиевого охрупчивания в конструкционных материалах в экстремальных условиях. Высокотемпературное гелиевое охрупчивание (ВГО) – это явление, при котором конструкционные материалы, контактирующие с гелием при высоких температурах и давлениях, становятся хрупкими и теряют прочность. Поэтому для поддержки решения задач физики плазмы и реакторостроения необходима разработка новых материалов с оптимизированными свойствами. Концепция энтропийно-стабилизированных сложных материалов открывает новое направление в разработке и производстве прорывных материалов для использования в экстремальных условиях, в частности, в современных ядерных реакторах. Хотя применение высокоэнтропийных материалов (ВЭМ) в термоядерных реакторах деления / синтеза пока находится на начальной стадии развития, оно представляется очень перспективным [308].

Отдельный большой блок перспективных задач посвящен решению задач по моделированию **композиционных материалов (КМ) и изделий (конструкций) из КМ – композитных структур (КС)**, которые представляют собой «конструкции в конструкциях». Для создания высокоадекватных математических моделей ПКМ применяются:

- метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) для анализа теплового и напряженно-деформированного состояний;
- метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) при моделировании пропитки препрега или связующим;
- технологии цифровых двойников.

Моделирование кинетики полимеризации – важный этап создания адекватных моделей изготовления ПКМ. Необходимо базировать модели на экспериментальных данных (дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), ИК-спектроскопия), учитывать сопряжение тепловых и химических процессов, интегрировать кинетические модели в мультифизические среды расчета. Среди зарубежных программ, использующихся для решения подобных задач, можно выделить COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, Abaqus UMAT, Digimat, Pam-RTM, Autodesk Moldflow и др. Среди отечественных разработок можно выделить:

- Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® [147] предназначена для управления процессами цифрового проектирования и моделирования, генерацией, обработкой, хранением, передачей и защитой больших объемов данных. Позволяет автоматизировать выполнение инженерных расчетов, структурировать все расчетные модели и варианты, упростить работу с базой данных расчетных моделей, результатами вычислений и расчетных вариантов, улучшить возможность представления и сравнения результатов инженерных работ. Технология разработки цифровых двойников и Цифровая платформа CML-Bench® выступают драйверами и интеграторами применения системы сквозных цифровых технологий класса Digital Engineering – Smart Design & Engineering [30] и средств управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM-систем) на российском рынке. Платформа содержит 380 тысяч цифровых и проектных решений. Главным принципом архитектуры платформы выступает модульность и возможность «бесшовного» подключения внешних программных САх-систем, включая системы инженерного анализа (CAE-систем). В Цифровую платформу CML-Bench® интегрированы 110 + 60 (170) лицензий САх (ЛОГОС (Аэродинамика, Гидродинамика, Прочность, Тепло), QuantorForm, Elcut, Fidesys, FlowVision, Универсальный механизм UM, ANSYS, LS-DYNA, SIMULIA/Abaqus, HyperWoks, MSC.Software и др.). Среди важных функциональных возможностей для моделирования композиционных материалов и изделий из них можно отметить:
 - работа под Linux (Astra, без Wine);
 - стабильность работы приложения;
 - вхождение в реестр российского ПО;
 - отсутствие импортозависимых компонентов и библиотек;
 - широкие возможности по моделированию механики (линейной и нелинейной), гидро и газодинамики, электромагнетизма;
 - управление моделью изделия из ПКМ как сборочной единицей с деталями, представляющими собой ламинаты, заполнители, вклеиваемые детали, геометрические модели материалов;
 - хранение модели с информацией об укладке в PDM;
 - и другие.
- Платформа от ГК «Росатом» для математического моделирования и инженерного анализа «Логос» [309], содержит много разных модулей «Логос Тепло», «Логос Прочность» и пр. Программное обеспечение предоставляет множество функций, которые помогают инженерам и научным исследователям анализировать и моделировать механическое поведение объектов. Включает в себя:
 - определение напряженно-деформированного – позволяет создавать модели

механических объектов и определять компоненты тензоров напряжений и деформаций в них. Это позволяет инженерам определить, какие нагрузки и воздействия могут привести к разрушению объекта, и смоделировать различные условия работы объекта;

- анализ усталости – включает инструменты для анализа усталости объектов. Они позволяют определить, какие нагрузки и деформации могут привести к появлению трещин и разрушению объекта в процессе эксплуатации;
 - моделирование динамики – позволяет моделировать динамические нагрузки на объекты, такие как вибрация и удары. Это позволяет инженерам определить, как объект будет реагировать на воздействие динамических нагрузок и какие меры могут быть приняты, чтобы предотвратить разрушение;
 - оптимизация конструкции – предоставляет инструменты для оптимизации конструкции объектов. Они позволяют инженерам проводить анализ на прочность конструкции и определять, какие изменения могут быть внесены для улучшения конструкции по тем или иным характеристикам при сохранении всех ограничений (например, оптимизация по массе);
 - имитация различных условий – позволяет имитировать различные условия эксплуатации объектов, такие как температура, влажность и другие параметры. Это позволяет инженерам определить, как объект будет вести себя в различных условиях и какие меры могут быть приняты.
- Новый модуль PLM-системы «САРУС+ Композиты» выпущен в 2025 году Национальной компьютерной корпорацией (разработчик ООО «ТопС Бизнес Интегратор») [149]. Предназначен для проектирования и технологической подготовки изделий из композиционных материалов. «САРУС+ Композиты» обеспечивает удобную работу конструктора с укладками ПКМ в процессе разработки изделия. Система поддерживает оперативное внесение изменений в проекты, сокращая время на доработки и повышая гибкость при решении сложных инженерных задач. Анализ укладки, предоставляет расширенные средства анализа отклонения волокон от направления укладки в процессе выкладки слоев. Система автоматически вычисляет массу и моменты инерции детали с учетом производственных ограничений и примененных технологических операций, исключая погрешности ручных расчетов. Это позволяет поддерживать высокую точность проектирования и свести к нулю необходимость внесения изменений на этапе производства. Экспорт данных и поддержка Astra Linux. Полностью совместим с Astra Linux (работа в нативном режиме без эмуляторов). Данный подход обеспечивает стабильную работу и выполнение требований отечественных ИТ-стандартов, а также повышает защищенность данных и упрощает процессы интеграции системы в существующие элементы инфраструктуры предприятий.
 - Программный комплекс «Манипула» [310] для моделирования композиционных материалов и конструкций на их основе, разработка МГТУ им. Н.Э. Баумана. В основе данного комплекса лежит метод расчета нелинейно-упругих характеристик композиционных материалов с конечными деформациями. Представлены универсальные модели определяющих соотношений для компонентов композита, задающих сразу несколько классов нелинейной связи между тензором напряжений Пиолы–Кирхгофа и градиентом деформаций в рамках разных энергетических пар тензоров напряжений–деформаций и др.

Современные направления развития цифрового моделирования полимерных композиционных материалов

Переход от макро- к мезо- и микро- масштабам требует бесшовной интеграции моделей для точного отражения поведения материалов в различных масштабах [311–314]. Изменчивость свойств материалов, возникающая из-за таких факторов, как производственные отклонения, дефекты и неоднородности, вносит неопределенность в процесс моделирования, необходимо учитывать эту изменчивость и ее влияние на эксплуатационные характеристики материалов [315–318].

Ряд важных математических формулировок нельзя применить на макроуровне, это ставит перед разработчиками и материаловедами важную проблему взаимоувязывания и описания микронеоднородного композиционного материала (далее – КМ) и уровня описания изделия (макро-неоднородную конструкцию, содержащую микронеоднородный КМ), для описания этого перехода между уровнями используется термин «мост» (μ -M bridge), именно для этого служит m-уровень, мезо-уровень (представлено на Рисунке 26) [319]. Особенность изделий из КМ характеризует классическая парадигма «материал-конструкция-технология», при цифровом моделировании КМ, как правило идет опора на эту парадигму, материал-конструкция-технология рассматриваются и проектируются сразу как единое целое [320].

Рисунок 26. Концепция уровней многомасштабного моделирования для КМ



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ по материалам [321], 2025

За последние сорок лет СПбПУ (отметим структурные подразделения НИЛ «Вычислительная механика» (CompMechLab®), Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга», Центр компетенций НТИ «Новые производственные технологии», Научный центр мирового уровня «Передовые цифровые технологии» и Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг») проф. А.И. Боровковым с соавторами – научными группами ученых и инженеров – были опубликованы более 130 научных работ в области механики композиционных материалов и композитных структур, полный перечень работ приведен в Приложении 2. В этих статьях рассмотрены и исследованы многие актуальные вопросы вычислительной механики композиционных материалов и композитных структур, а также вопросы математического и компьютерного моделирования многоуровневого / многомасштабного (MultiScale) описания и поведения микро- и макронеоднородных гетерогенных материалов и структур с анизотропными компонентами, включая гетерогенные наноструктуры. Особое внимание в публикациях уделяется фундаментальным задачам механики композитов: **принципу**

локальности, методам многоуровневой гомогенизации (MultiScale Homogenization Method на основе μ - m - M -принципа гомогенизации), определению эффективных физико-механических характеристик реальных композитов и последовательной гетерогенизации (Sequential Heterogenization), формированию тензорно-полиномиальных критериев прочности макроскопически анизотропных композиционных материалов, описанию и моделированию разнообразных механизмов разрушения композиционных материалов на микроуровне, а также применению этих подходов для решения инженерных и промышленных задач [322].

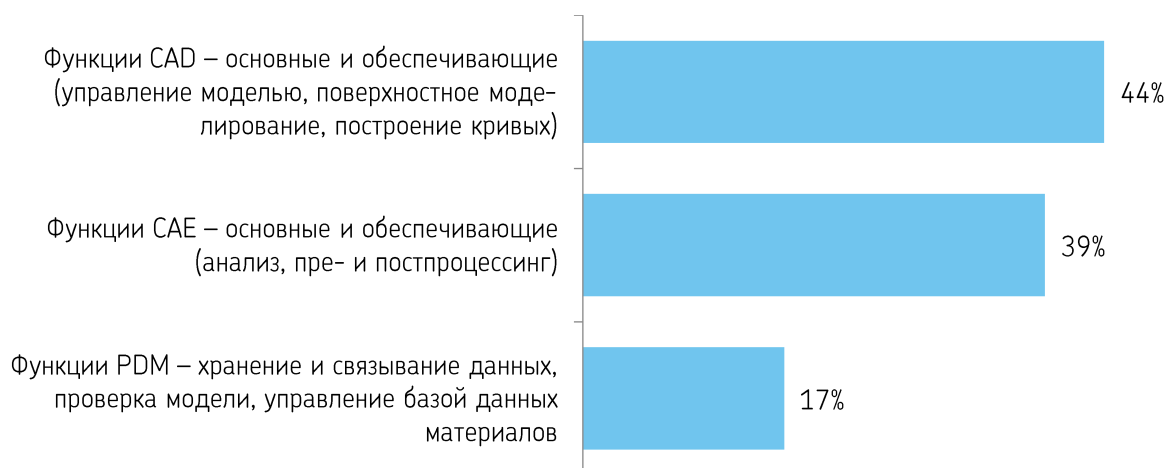
В основе современного подхода к разработке Цифрового двойника композиционного материала в контексте цифрового двойника изделия лежит опора на взаимоувязанные триады [321]:

- «Материал – Технология – Конструкция».
- Цифровой двойник на стадии «Разработка – Производство – Эксплуатация».

3.2. Технологии построения цифровых (виртуальных) испытательных стендов и полигонов для моделирования композиционных материалов

Многие организации атомной отрасли активно используют специализированное ПО для цифрового моделирования материалов и изделий из них, в том числе композиционных. По результатам опроса, проведенного Инфраструктурным центром «Технет» СПбПУ, также были получены данные об использовании ПО при проектировании и моделировании изделий из композиционных материалов. Вопрос подразумевал множественный ответ, при этом большинством респондентов было отмечено использование CAD-систем (Рисунок 27).

Рисунок 27. Структура ответов об использовании или планировании к использованию ПО при проектировании и моделировании изделий из композиционных материалов, в организациях, прошедших опрос, % оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса, 2025

Также респондентам были предложены следующие варианты ответа с задачами, решаемые с использованием функциональных возможностей CAD-систем в части проектирования композиционных материалов: контроль расположения и ориентации волокон (системы координат, переходы, форма вершин), построение моделей микроструктуры композиционного материала (моделирование КМ на

микроуровне), поддержка технологических особенностей изделий из композиционных материалов, построение объемных и внутренне полых моделей (внутренние поверхности, тела ламината, сечения), создание производных и модифицируемых моделей, управление ламинатами и слоями (порядок слоев, особые зоны, развертки). Респонденты отметили, что чаще всего CAD-системы в части проектирования композиционных материалов используются для контроля расположения и ориентации волокон (системы координат, переходы, форма вершин). Распределение полученных ответов представлено на Рисунке 28. Вопрос подразумевал множественный ответ.

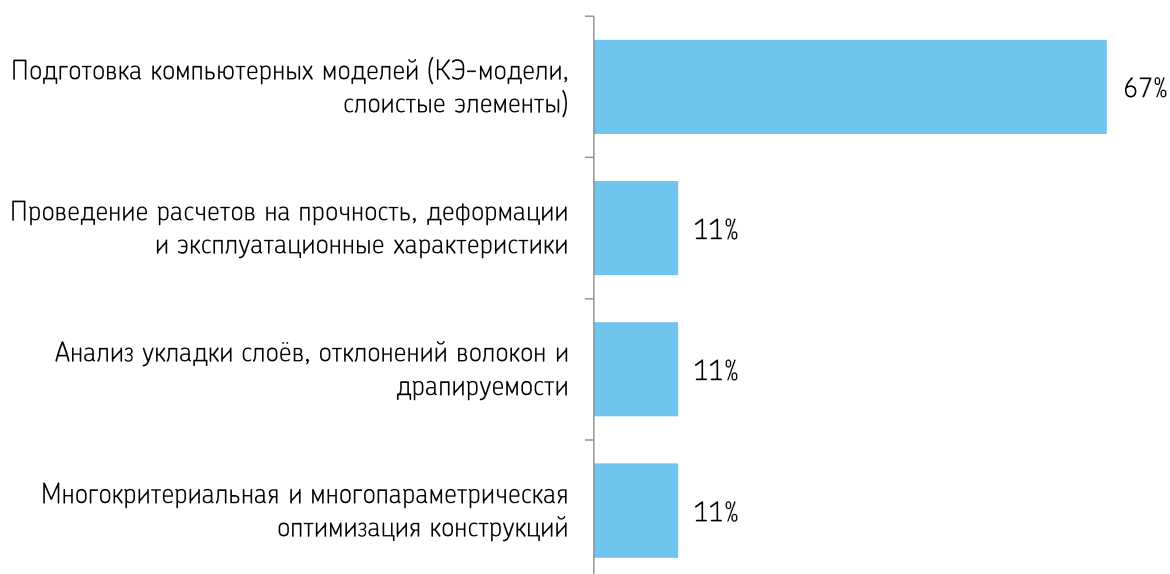
Рисунок 28. Структура ответов о задачах, решаемых с использованием функциональных возможностей CAD-систем в части проектирования композиционных материалов (КМ),
% оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса, 2025

В ходе опроса, проведенного Инфраструктурным центром «Технет», в качестве основной задачи, решаемой с использованием функциональных возможностей CAE-систем в части моделирования композиционных материалов, респонденты выделили подготовку компьютерных моделей, таких как конечно-элементные (КЭ) модели и модели слоистых элементов. Распределение полученных ответов представлено на Рисунке 29. Вопрос подразумевал множественный ответ.

Рисунок 29. Структура ответов о задачах, решаемых с использованием функциональных возможностей САЕ-систем в части моделирование композиционных материалов, % оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса, 2025

По итогам опроса, проведенного Инфраструктурным центром «Технет» среди представителей рынка, были получены данные об используемых и планируемых к использованию отечественных и зарубежных САЕ-систем для моделирования изделий из композиционных материалов. К ним относятся: «САРУС.САЕ», «ЛОГОС», «Creo», «FlowVision», «APM WinMachine», «Ansys», «Ansys LS-DYNA».

Респонденты отметили, что используют или планируют использовать такие отечественные и зарубежные САЕ-системы при проектировании и моделировании изделий из композиционных материалов, как «САРУС.САЕ», «Creo», «Компас-3D». Респонденты не указали отечественные или зарубежные САЕ-системы и САЕ-системы, используемые или планируемые к использованию в их организациях при проектировании и моделировании изделий из композиционных материалов. Также респонденты отметили, что используют или планируют использовать модуль зарубежной PDM-системы «IPS PDM ТК» при проектировании и моделировании изделий из композиционных материалов.

По итогам опроса участников рынка также было отмечено, что в процессе разработки и постановки на производство изделий с применением конструкций из композиционных материалов чаще всего используется ПО на этапе эскизного проектирования изделий и на этапе рабочего проектирования изделий, и реже – на этапе моделирования микроструктуры материалов и определения их физико-механических характеристик и технологической подготовки производства изделий. Распределение полученных ответов представлено на Рисунке 30. Вопрос подразумевал множественный ответ.

Рисунок 30. Структура ответов по использованию специализированного ПО на этапах процесса разработки и постановки на производство изделий с применением конструкций из композиционных материалов, % оценок респондентов



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» по результатам опроса, 2025

На современном этапе развития материаловедения на основе баз данных о физикомеханических свойствах материалов можно формировать структурированные наборы данных, используемые для обучения и тестирования моделей машинного обучения (Machine Learning), для анализа данных, выявления закономерностей, а также для оценки качества новой модели после обучения, но часто эти данные недоступны для открытого использования.

Ведутся разработки по формированию единых баз данных с описанием свойств материалов для 3D-печати, например, в 2025 году специалисты ГК «Росатома» завершили формирование комплексной базы данных свойств российских материалов, полученных по технологии селективного лазерного плавления (СЛП) [323]. Ожидается, что ее использование позволит в 3–5 раз ускорить время подбора материалов для изготовления сложных металлических изделий, используемых в авиационной и космической отраслях, атомной отрасли, энергетике, двигателестроении (везде, где требуется изготовление сложных деталей из металлических сплавов). В базе представлены более 60 критически важных характеристик материалов, сплавов, металлопорошковых композиций, сталей, полученных как традиционными методами, так и различными аддитивными технологиями: от состава порошков и свойств композитов до технологий изготовления заготовок, методов постобработки и контроля качества изделий. Она также содержит данные испытаний и унифицированные аддитивные методики для стандартизации процессов. В процессе исследований установлено, что основные механические свойства материалов, полученные аддитивными способами, не уступают, а в ряде случаев превосходят свойства материалов, полученные традиционными технологиями, а также характеризуются более узким разбросом свойств от образца к образцу.

Однако следует отметить, что базы данных хорошо работают для определенных типов материалов и веществ, например, для некоторых металлических сплавов, для которых имеется в доступе большое количество данных о взаимосвязи макроскопических свойств с их рецептурным составом, а для композиционных материалов данных в настоящее время еще слишком мало для построения

высокоадекватных математических моделей. Нужно также отметить вклад в развитие механики композитов таких ученых, как Б.Д. Аннин, В.В. Болотин, Л. Браутман, Г.А. Ванин, В.В. Васильев, Э.И. Григолюк, Ю.И. Димитриенко, П.А. Зиновьев, В.Д. Протасов, Ю.Н. Работнов, В.П. Тамуж, Ю.М. Тарнопольский, Н. Пейгано, Б.Е. Победря, А.М. Тимонин и др. [324–326]. Ряд работ показывает, что результаты численного и экспериментального моделирования достаточно хорошо совпадают [327].

С учетом всего изложенного выше и в разделе 3.1., для моделирования композиционных материалов и композитных структур важно применение технологий цифровых двойников в соответствии с основными положениями национального стандарта ГОСТ Р 57700.37–2021, а также проведение **верификации и валидации полученных моделей** на специализированных **цифровых (виртуальных) испытательных стендах (ВИС) и полигонах (ВИП) на всех на всех этапах жизненного цикла:**

- на стадии разработки (ЦД-Р);
- на стадии производства (ЦД-П);
- на стадии эксплуатации (ЦД-Э).

Также важно учитывать положения ГОСТ Р 57700.42–2023 «Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Общие положения» и ГОСТ Р 57700.43–2023 «Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Верификация программного обеспечения».

В настоящее время можно выделить **четыре уровня экспериментальных исследований композиционных материалов и конструкций из них:**

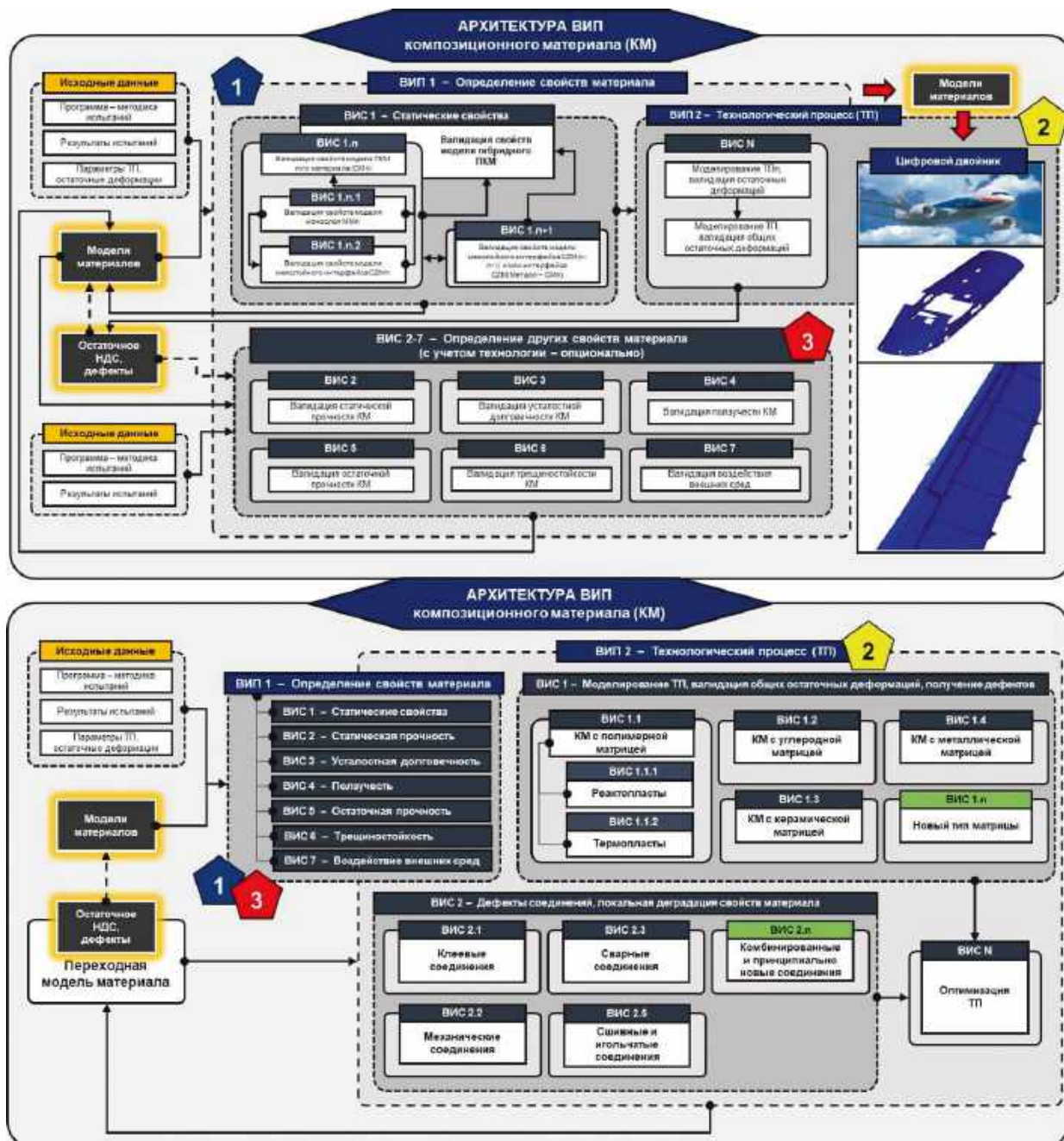
1. Определение характеристик монослоя и накопление данных о материалах (общая квалификация).
2. Испытания образцов, технология изготовления которых соответствует технологии изготовления изделия (специальная квалификация).
3. Испытания конструктивно-подобных образцов, то есть образцов, непосредственно, вырезаемых из элементов конструкций.
4. Испытания изделий.

На начальной стадии разработки цифрового двойника композиционного материала должно проводиться исследование статических механических свойств материалов (моделирование в рамках ВИП 1 и ВИС 1). Моделирование проводится с опорой на стандарты, например, для структурно-ортоотропных слоистых материалов, армированных непрерывными волокнами или тканями, основные методы исследования опираются на стандарты ASTM (для статических свойств в плоскости слоя ASTM D 3039, ASTM D 3410, ASTM D 3518 [328–330], а для межслойного интерфейса – стандарты ASTM D 5528, ASTM D 7905, ASTM D 6671 [279, 280], по результатам испытаний уточняются математические модели материала.

Архитектура ВИП на текущем уровне разработки и понимания особенностей композиционного материала, представленная на Рисунке 31, соответствует требованиям, сформированным в соответствии с логической схемой построения цифрового двойника композиционного материала, требования, сформированы относительно реальных задач и критически важных вопросов математического и компьютерного моделирования конкретных изделий и технологических процессов. В процессе разработки технологии создания цифрового двойника композиционного материала особое внимание уделяется мезоуровню, на котором для цифрового двойника КМ прорабатываются два основных

цифровых (виртуальных) испытательных полигона (ВИП) [322]: ВИП 1 «Свойства материала» и ВИП 2 «Технологический процесс».

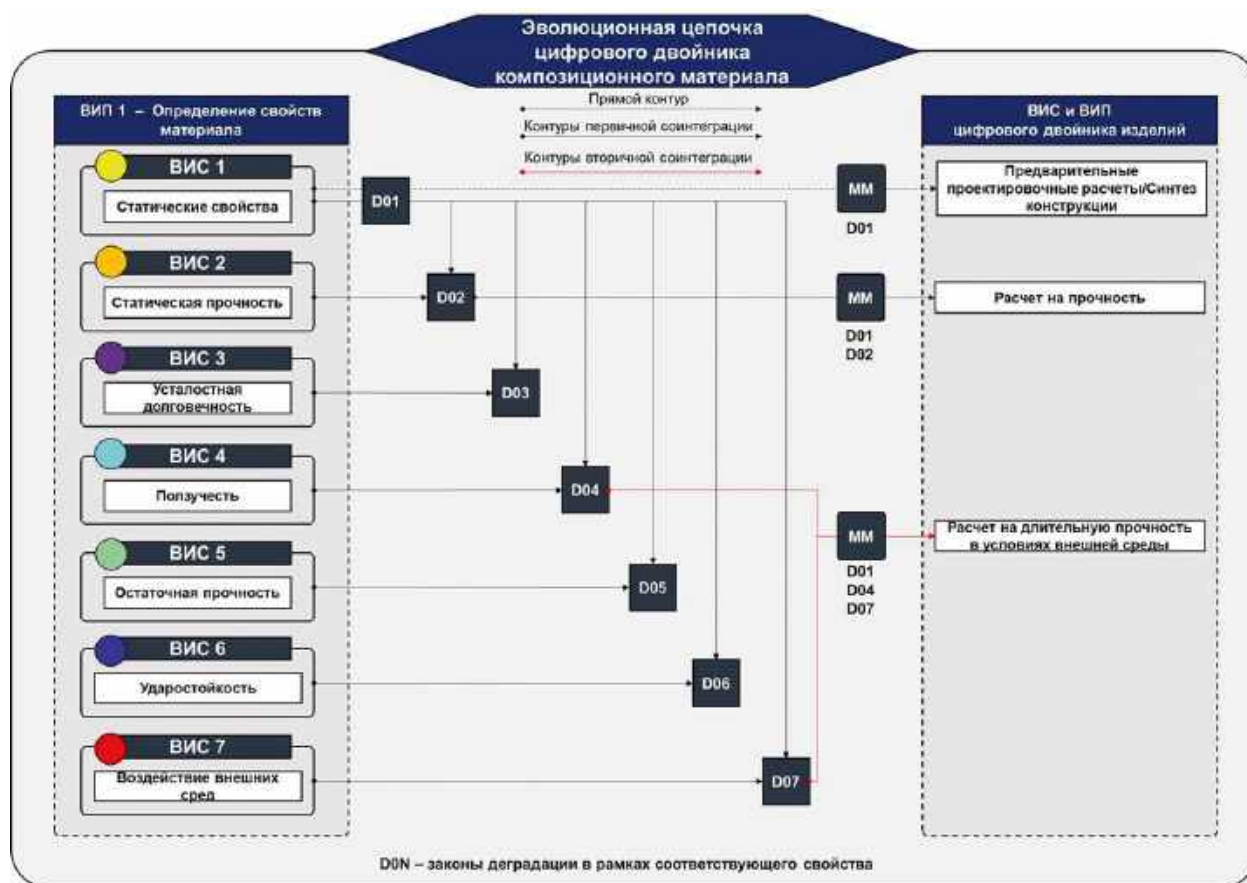
Рисунок 31. Архитектура ВИП цифрового двойника композиционного материала



Источник: ПИШ СПбПУ «Цифровой инжиниринг»

Эволюционная цепочка развития и наполнения цифрового двойника композиционного материала новыми более сложными и физически более точными цифровыми моделями (в зависимости от конкретных задач цифрового двойника изделия) может иметь несколько уровней соинтеграции моделей материалов. Пример эволюционной цепочки, описывающий эволюцию модели материала из ВИП 1 для цифрового двойника изделия на стадии разработки и частично на стадии эксплуатации представлен на Рисунке 32.

Рисунок 32. Эволюционная цепочка развития и наполнения цифрового двойника композиционного материала данными на Цифровой платформе по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®



Источник: ПИШ СПбПУ «Цифровой инжиниринг», 2025

Модели материалов могут быть интегрированы с цифровым двойником изделия на разных этапах разработки цифрового двойника композиционного материала [322].

Выводы:

Использование передовой технологии цифровых двойников в атомной промышленности снижает себестоимость разработки и производства благодаря большому количеству цифровых испытаний на специализированных цифровых (виртуальных) испытательных стендах и полигонах. Для этого используются математические и компьютерные модели, которые прошли процедуры верификации и валидации и обладают высоким уровнем адекватности мультидисциплинарным физико-механическим процессам в промышленных изделиях.

При моделировании материалов на ранних стадиях разработки, важно начинать с подробно калиброванных моделей изготовления, далее – переходить к интеграции в макромоделли конструкции, уделять внимание сбору экспериментальных данных, внедрять технологии цифровых двойников согласно национальному стандарту ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий Общие положения» и адаптировать материалы под требования атомной отрасли.

По результатам опроса, проведенного Инфраструктурным центром «Технет» среди представителей рынка, ключевым событием атомной отрасли в части цифрового моделирования композиционных материалов в 2025 году является создание моделей композиционных материалов с предсказуемыми характеристиками. Половина из респондентов планирует в течение 5 лет начать пользоваться специализированным ПО для проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов в организации.

Для достижения прорывов в области цифрового моделирования материалов, в том числе композиционных, необходимо осуществлять подготовку инженеров мирового уровня для атомной отрасли. Так, например, Передовой инженерной школе СПбПУ «Цифровой инжиниринг» реализуется программа по направлению «Системный цифровой инжиниринг в атомном машиностроении», которая формирует кадровый потенциал высококвалифицированных инженеров для компаний атомной отрасли [26].

Внедрение передовых методик разработки и моделирования материалов предприятиями атомного машиностроения и энергомашиностроения позволит ускорить разработку продукции с функциональными и техническими характеристиками, не уступающими, а иногда и превышающими мировой уровень, и сформировать научно-технический задел, необходимый для обеспечения технологического суверенитета и лидерства Российской Федерации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный этап развития ядерных технологий предъявляет особые требования к конструкционным и функциональным материалам: расширенный диапазон рабочих температур при сохранении свойств, повышенная радиационная стойкость, длительные сроки службы и устойчивость к сложным эксплуатационным режимам. В этих условиях особое значение приобретают композиционные материалы, свойства которых могут целенаправленно меняться за счет подбора матрицы и компонентов, что открывает возможности для создания легких, прочных, коррозионностойких и магнитоинертных конструкций. Развитие указанных направлений невозможно без опоры на **передовые методы цифрового моделирования композиционных материалов и инженерное программное обеспечение**, позволяющие проводить многоуровневое численное моделирование поведения материалов и конструкций в экстремальных условиях.

В рамках настоящего экспертно-аналитического доклада проведен комплексный анализ ключевых аспектов развития технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли, включая атомное машиностроение. Рассмотрены основные типы композиционных материалов и области их применения в мире и в России. Проанализированы мировая и российская атомная отрасль, рынки инженерного ПО и технологий цифрового моделирования композиционных материалов, ключевые технологические и рыночные тенденции, а также обозначена российская специфика, связанная с задачами обеспечения технологического суверенитета и лидерства, импортозамещения и развития собственной программно-технологической базы.

Первая глава доклада посвящена анализу текущего состояния и динамики развития сферы цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли с учетом сегмента атомного машиностроения. В рамках главы рассматриваются направления применения технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли, проводится обзор основных типов композиционных материалов по ключевым областям применения, а также анализируется текущее состояние мирового и российского рынков, ключевые события отрасли, страны-лидеры, специализированные программные продукты. Приведены примеры реализованных российских и зарубежных проектов по технологиям разработки и применению композиционных материалов, а также применению технологий цифровых двойников в атомной отрасли, в том числе проекты по разработке цифровых двойников малых модульных реакторов.

Основные направления применения композиционных материалов в атомной отрасли включают:

- изготовление компонентов из композиционных материалов (углеродное волокно);
- исследование тепловыделяющих элементов с композитной оболочкой на основе карбида кремния, способных повысить безопасность и эффективность АЭС (технология находится на стадии НИОКР и опытных образцов, промышленное внедрение ожидается в 2030–2045 гг.);
- использование композиционных материалов в решениях для утилизации отработанного ядерного топлива (на ранней научно-исследовательской стадии).

Отдельное внимание в докладе уделено российской специфике: положению отечественной отрасли на мировом рынке, актуальным проектам и вызовам, связанным с импортозависимостью и задачами формирования собственной программно-технологической базы. По результатам проведенного Инфраструктурным центром «Технет» опроса, текущее состояние технологий цифрового

моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли оценивается российскими участниками как стабильное развитие.

Во второй главе рассматриваются перспективы развития мировой и российской атомной отрасли и рынков цифрового моделирования, ключевые драйверы роста (распространение ММР, развитие водородных технологий на базе АЭС) и барьеры развития (кадровый дефицит, потребность в финансировании проектов строительства АЭС, зависимость от импортных технологий, усиление санкционного давления и конкуренции на мировом рынке). Показано, что разработка новых материалов и технологий их цифрового моделирования является сквозным направлением, определяющим устойчивое развитие атомной отрасли и укрепление позиций Российской Федерации. В качестве примера действующих мер поддержки развития отрасли среди прочих выделяется **национальный проект технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии»**.

Ключевые отличия тенденций в российской сфере цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли от мировых связаны с высокой степенью интеграции и централизации атомной отрасли, ее нацеленностью на решение государственных стратегических задач, широкими технологическими компетенциями, выходящими за пределы отраслевых границ, способностью к активному строительству АЭС «под ключ» за пределами границ Российской Федерации, наличием у российских участников активного опыта в проектировании и строительстве промышленных АЭС с реакторами различных типов (водо-водяных, реакторов с натриевым и свинцово-висмутовым охлаждением) и наличием малых АЭС в промышленной эксплуатации. В главе анализируются направления эволюции глобальной атомной энергетики и рынка цифрового моделирования композиционных материалов, включая **рост роли информатики материалов (Materials Informatics) и интеграции технологий цифровых двойников**.

В рамках третьей главы настоящего доклада проведен анализ технологий моделирования полимерных композиционных материалов для атомной отрасли с учетом технологий изготовления, остаточной прочности, усталости, ползучести и трещинообразования, включая анализ методик моделирования процесса изготовления ПКМ в части кинетики полимеризации для построения высокоадекватных математических моделей композиционных материалов. Показано, что в условиях высоких требований к долговечности, радиационной стойкости и устойчивости к термальному циклированию моделирование поведения ПКМ является необходимым инструментом для оценки надежности и прогнозирования ресурса эксплуатации конструкций, а полученные в главе результаты могут быть основой для выработки практических рекомендаций по развитию соответствующих технологий.

В главе описаны как традиционно используемые в атомной отрасли подходы к цифровому моделированию (информационное, 3D- и 4D-моделирование, расчётные методы), так и перспективные направления развития, в частности, технологии построения цифровых (виртуальных) испытательных стендов (ВИС) и полигонов (ВИП).

Отдельный блок главы посвящен перспективным материалам и концепциям, а также задачам по моделированию композитных структур как «конструкций в конструкциях». Показано, что применение передовой технологии цифровых двойников в соответствии с национальным стандартом ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» с учетом адаптации материалов к специфике атомной отрасли позволяет существенно снизить себестоимость разработки и производства за счет переноса значительной части испытаний

на специализированные ВИС и ВИП, в которых используются верифицированные и валидированные математические и компьютерные модели.

Полученные в ходе подготовки экспертно-аналитического доклада результаты подкреплены данными отраслевых отчетов, практического опыта инжиниринговых и производственных организаций атомной отрасли, а также опроса экспертов и участников рынка Национальной технологической инициативы, проведенного Инфраструктурным центром «Технет» (передовые производственные технологии) при поддержке АНО «Платформа НТИ». Среди прошедших опрос – представители ГК «Росатом», АО «ТВЭЛ», АО «ЮМАТЕКС», АО «НИКИЭТ», АО «НИИГрафит», АО «Росатом Наука», НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ООО «ТЕСИС» и др.

Полученные результаты могут быть использованы государственными органами управления, госкорпорациями и отраслевыми компаниями при формировании стратегий и дорожных карт развития атомной отрасли, а также при планировании долгосрочных НИОКР в области разработки композиционных материалов и развития технологий их цифрового моделирования. Для научно-образовательных организаций доклад представляет интерес как источник обобщенного анализа актуальных научно-технических задач и востребованных компетенций, в том числе в части подготовки специалистов по системному цифровому инжинирингу и информатики материалов. Для разработчиков программного обеспечения и цифровых платформ представленные материалы могут служить ориентиром при формировании продуктовых стратегий и приоритизации функциональных модулей, связанных с моделированием композиционных материалов, в том числе для применения в атомной отрасли.

Таким образом, экспертно-аналитический доклад, прошедший отраслевую экспертную оценку, формирует целостное представление о текущем состоянии и перспективах развития технологий цифрового моделирования композиционных материалов в атомной отрасли, с основным фокусом на сегмент атомного машиностроения, на основе комплексного анализа отечественного и мирового опыта инжиниринговых и производственных организаций атомной отрасли, научно-технического задела и результатов отраслевого опроса. В докладе отмечается важность внедрения передовых методик разработки и моделирования композиционных материалов предприятиями атомного и энергомашиностроения. Также описаны преимущества использования цифровых платформ и технологий цифровых двойников для переноса значительной части испытаний в цифровую среду, снижения себестоимости разработки и повышения точности прогнозирования ресурса. Это в совокупности позволит ускорить разработку продукции с функциональными и техническими характеристиками, превышающими мировой уровень, и сформировать научно-технический задел, необходимый для обеспечения технологического суверенитета и лидерства Российской Федерации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ И РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТЕХНОЛОГИЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Малые и средние или модульные реакторы и микрореакторы

К числу преимуществ ММР можно отнести следующие:

- Меньшая потребность в начальных капитальных вложениях. Так, расходы на строительство 2–4х блочной АСММ составляют 0,5–1 млрд. долл. против 10–20 млрд долл. для АЭС обычного размера [333].
- Короткие сроки строительства (3–4 года). Использование ММР делает возможным более быстрое возведение АЭС, что позволяет сокращать расходы на проценты по кредитам.
- Модульная конструкция и возможность достижения экономии за счет серийного заводского производства реакторных модулей и сокращения потребности в рабочей силе на объекте строительства.
- Возможность размещения на удаленных территориях без подключения к единой энергосети;
- Гибкость в размещении площадки АЭС, включая (в перспективе) подземное и морское размещение малой АЭС.
- Строящиеся малые АЭС обладают улучшенными пассивными системами безопасности. Ряд конструкций (например, с жидкометаллическим теплоносителем) обладает повышенной устойчивостью к нештатным ситуациям.
- Широкий спектр применения. ММР могут применяться для производства электроэнергии, тепла для технологических нужд, опреснения воды, производства водорода и централизованного отопления населенных пунктов.
- Гибкость применения и возможность оперативно наращивать или сокращать генерацию. АЭС с ММР позволяет интегрировать их использование с возобновляемыми источниками энергии для компенсации временных сокращений в выработке энергии из-за погодных условий.
- Доступность и удобство для развивающихся стран. Относительно невысокая стоимость и нетребовательность к местной инфраструктуре повышают привлекательность проектов АЭС с ММР для развивающихся стран с ограниченными финансовыми ресурсами.

К основным недостаткам ММР можно отнести следующие:

- Более высокие расходы на ядерное топливо, чем в случае с крупными АЭС [334].
- Отсутствие экономии от эффекта масштаба. Отсутствие крупной серии в производстве ММР не позволяет продемонстрировать главную теоретическую выгоду – массовое производство компонентов АЭС на заводах.
- Для большинства проектов все экономические расчеты носят только теоретический характер. Реальная оценка может быть дана только после реализации проектов на практике. Также существование ММР в формате «первый в своем роде» (First of a kind, FOAK) делает трудным практику государственного регулирования работы АЭС.
- Малая мощность реакторов означает нишевое использование в современной энергосистеме;
- Сложность привлечения коммерческих инвесторов на долгосрочные инвестиции (свыше 10 лет окупаемости). Необходимость привлечения государственного финансирования и

непрямой государственной поддержки в виде изменения регулирования, разделения рисков и пр.

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (HTGR/VHTR)

К основным преимуществам ВТГР можно отнести следующие:

- Высокая термодинамическая эффективность. Температура теплоносителя в наиболее совершенных конструкциях может достигать 1000 °С. КПД при производстве электроэнергии у ВТГР потенциально достигает 45–50% (при уровне 32–38% у водоохлаждаемых реакторов).
- Повышенная безопасность. Конструкция ВТГР обеспечивает автоматическое затухание цепной реакции при росте температуры, а также невозможность образования взрывоопасной водородной смеси, характерной для водоохлаждаемых реакторов. При этом продвинутое трехструктурное изотропное топливо, используемое в ВТГР, может выдерживать температуры до 1600 °С и выше, а инертный гелиевый теплоноситель практически не поглощает нейтроны.
- Эффективность использования топлива. При работе ВТГР обеспечивается очень высокое выгорание атомного топлива. При этом ОЯТ выгруженные из реакторов ВТГР отличаются меньшей радиотоксичностью по сравнению с большинством существующих типов реакторов.
- Эксплуатационные преимущества. Реакторы ВТГР обладают высокой маневренностью с возможностью быстро менять мощность реактора. Дополнительным положительным фактором является более низкое радиационное загрязнение оборудования благодаря лучшей химической и механической стойкости топлива. Также ВТГР могут изготавливаться по модульной схеме, со значительной частью изготовления крупных блоков конструкции в заводских условиях, что снижает стоимость [206].
- Меньшая зависимость от действий оператора во время аварии. Благодаря низкой удельной мощности реактора и высокой теплоемкости конструкции активной зоны, в случае аварии и в отсутствие действий оператора повышение температуры реактора не доходит до критических значений в течение нескольких дней или даже более недели [205].

К основным недостаткам ВТГР можно отнести следующие:

- Значительно (на порядок) больший объем отработанного ядерного топлива, чем у водоохлаждаемых реакторов. При этом отработанные технологии переработки шарообразных тепловыделяющих элементов на сегодняшний день отсутствуют. Побочным результатом работы ВТГР является большой объем облученного графита, также требующим утилизации. При этом технологии переработки отработанного графита отсутствуют, и ключевым способом обращения с ним является долгосрочное хранение с тщательной изоляцией от внешней среды.
- Ограничения конструкции. ВТГР обладают большим размером, по сравнению с доминирующими на рынке водоохлаждаемыми реакторами, с более громоздкой теплоизоляцией. Оптимальная мощность для ВТГР существенно меньше 1000 МВт, что делает возможным применение этой конструкции только в классе малых реакторов.
- Наличие специфических рисков. ВТГР обладают повышенными требованиями к материалам и герметичности конструкции из-за использования гелия. При нарушении барьеров между контурами возможно проникновение примесей в реакторный контур.

- Производство шарообразных тепловыделяющих элементов требует высочайшего качества контроля при производстве (количество микротрещин для работы должно исчисляться миллиардами штук) [206].

Жидкосолевые реакторы (реакторы на расплавах солей)

Основные преимущества жидкосолевых реакторов представлены ниже:

- **Высокая естественная безопасность.** В силу отрицательного температурного и пустотного коэффициента реактивности ЖСР и отсутствие давления в контуре реактора при высокой температуре (~700 °C) исключается возможность тяжелых аварий по типу чернобыльской [335].
- **Высокая температурная эффективность.** Жидкосолевые реакторы работают при достаточно высоких температурах, по сравнению с водоохлаждаемыми реакторами, что позволяет обеспечивать более высокую тепловую эффективность производства электроэнергии. [207].
- **Более легкое изготовление топлива.** Конструктивные особенности ЖСР не требуют использования тепловыделяющих элементов, а сама топливная композиция одновременно является теплоносителем первого контура [335].
- **Эффективная утилизация радиоактивных отходов.** ЖСР способны эффективно «дожигать» минорные актиноиды в ОЯТ. При этом образующиеся радиоактивные отходы при работе ЖСР являются в основном короткоживущими, с периодом полураспада 30–50 лет, за счет чего становится безопасным приповерхностное хранение таких отходов (вместо глубинного захоронения) [335].
- **Гибкая эксплуатация.** Благодаря отсутствию ТВЭЛов при работе ЖСР отсутствуют ограничения по глубине выгорания топлива. Топливная композиция может перегружаться и очищаться без остановки реактора, а переработанное топливо может возвращаться в цикл работы [335]. В топливной композиции ЖСР может использоваться плутоний, что важно в случае наличия его крупных запасов. Также для ЖСР предлагаются решения с использованием тория [207].

К недостаткам жидкосолевых реакторов можно отнести следующие:

- **Отсутствие испытанных барьеров безопасности.** Реакторная установка ЖСР лишена привычных барьеров – нет твердой матрицы топлива и оболочек тепловыделяющих элементов. Для ЖСР необходима разработка новых подходов к обеспечению безопасности и развитие новой нормативной базы, отличающейся от стандартов, регулирующих работу реакторов с твердым топливом [335].
- **Отсутствие опыта промышленной эксплуатации.** В настоящее время ЖСР не являются промышленно испытанной технологией. Единственный в мире экспериментальный жидкосолевой реактор MSR функционировал 5 лет в 1960-х годах в США, после чего был остановлен по причине нерентабельности [335].

Быстрые реакторы

К ключевым преимуществам быстрых реакторов относятся следующие:

- Возможность достижения коэффициента воспроизводства топлива выше единицы, за счет чего при работе реактора нарабатывается топливо для быстрых и тепловых реакторов. Соответственно, в результате более эффективного использования топлива значительно увеличиваются доступные для атомной отрасли ресурсы урана.
- Замыкание топливного цикла за счет использования различных быстрых реакторов позволит не только увеличить эффективность использования ядерного топлива, но и уменьшить объем радиоактивных отходов.
- Высокая безопасность. Конструкции быстрых реакторов отличаются высокой пассивной безопасностью и устойчивостью к тяжелым авариям с повреждениями активной зоны. Для быстрых реакторов на расплавах солей также дополнительным фактором безопасности является медленное повышение температуры в реакторе в случае нештатных ситуаций.
- Экономическая эффективность. Крупные быстрые реакторы (такие как БН-1200) обладают потенциалом сравняться по эффективности строительства с наиболее распространенными водоохлаждаемыми реакторами.

Основные недостатки быстрых реакторов включают представленный ниже ряд:

- На сегодняшний день все существующие модели быстрых реакторов дороже реакторов на тепловых нейтронах. Строительство быстрого реактора, сравнимого по стоимости с тепловым потенциально возможно в середине 2030-х годов (БН-1200).
- Для быстрых реакторов необходимо использование ядерного топлива с большим обогащением, нежели в случае тепловых [11].
- В случае натриевых быстрых реакторов: натрий способен реагировать с водой и воздухом, что создает опасность пожара при утечке. Также натриевые реакторы требуют строительства промежуточного натрий-натриевого контура для отделения от парогенератора.
- В случае свинцовых реакторов: при строительстве реакторов, использующих свинец, необходим тщательный учет сейсмических рисков при строительстве реакторной установки [12]. Для использования на АЭС реакторов со свинцовым теплоносителем необходим особенно тщательный выбор материалов и покрытий [12]. Отдельную проблему для данного типа реакторов также составляет отсутствие существующих энергетических установок, на которых могло бы производиться тестирование тепловыделяющих элементов [13].
- В случае газоохлаждаемых быстрых реакторов: менее эффективное охлаждение, по сравнению с водоохлаждаемыми реакторами или реакторами с жидкометаллическим или солевым теплоносителем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПРОФ. А.И. БОРОВКОВЫМ В СОАВТОРСТВЕ С ДРУГИМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯМИ

1. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench® (часть 7): разработка и применение цифровых двойников композиционных материалов / А. Боровков, Д. Ожгибесова, А. Глазунов [и др.] // САПР и графика. – 2025. – № 7(347). – С. 4-18. URL: <https://sapr.ru/article/26846>
2. Тренды и перспективы развития цифрового проектирования и моделирования (включая цифровые технологии моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов). Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков [и др.]; ред. А.И. Боровков. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. 140 с. URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2025/06/30/2025_0630_cpim_kompozicionnyh_materialov_tekhnet.pdf.
3. Ozhgibesova D., Borovkov A., Shtegman V., Zainullina D., Asanidze S., Shulga M., Kolchev D., Mukhametova P. Digital twins of composite materials. XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 PROCEEDINGS. Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics. 2024. С. 289-294.
4. Nemov A.S., Borovkov A.I., Schrefler B.A. Multiscale thermoelastic modelling of composite strands using the “fundamental solutions” method // Computational Mechanics. 2022. (<https://doi.org/10.1007/s00466-022-02185-8>) (H-index = 104, Q1)
5. Kiauka M., Pudeleva O., Tamm A., Borovkov A. THE CURING SIMULATION AND PREDICTION OF SHAPE DISTORTION OF THERMOSET COMPOSITE REINFORCED WITH 3D WOVEN // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3rd International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems. BRISTOL, 2021. P. 012041.
6. Kiauka M., Kasatkin M., Tcygantceva I., Efimov-Soini N., Borovkov A. Method for residual strain modeling taking into account mold and distribution of heat transfer coefficients for thermoset composite material parts // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 117. (<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07149-5>) (H-index = 124, Q1).
7. Kiauka M., Pudeleva O., Sergeev V., Tamm A., Borovkov A. The curing simulation and prediction of shape distortion of thermoset composite reinforced with 3D woven // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 986.
8. Borovkov A.I., Maslov L.B., Ivanov K.S., Kovaleva E.N., Tarasenko F.D., Zhmaylo M.A. Application of finite element homogenization technique for efficient modeling of additively manufactured metamaterials // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD). – 2020. – 10. – 3. С. 14861-14878.
9. Smirnov, A. Revisited applicability of polymeric composite materials for designing tractor

- hoods / A. Smirnov, D. Lebedev, M. Aleshin, O. Rozhdestvenskiy, S. Nikulina, A. Borovkov // *Materials Physics and Mechanics*, 2018, no. 40, pp. 231–238.
10. Lebedev D. Applicability of polymer composite materials in the development of tractor Falling-Object Protective Structures (FOPS) / D. Lebedev, A. Okunev, M. Aleshin, K. Ivanov, O. Klyavin, S. Nikulina, O. Rozhdestvenskiy, A. Borovkov // *Materials Physics and Mechanics*, 2017, no. 34, pp. 90–96.
 11. Zobacheva A. Design and simulation of additive manufactured structures of three-component composite material / A. Zobacheva, A. Nemov, A. Borovkov, A. Novokshenov, M. Khovaiko, N. Ermolenko // *Materials Physics and Mechanics*, 2017, no. 34, pp. 51–58.
 12. Shymchenko A. Review of the computational approaches to advanced materials simulation in accordance with modern advanced manufacturing trends / A. Shymchenko, V. Tereshchenko, Y. Ryabov, S. Salkutsan, A. Borovkov // *Materials Physics and Mechanics*, 2017, no. 32, pp. 328–352.
 13. Zobacheva A. Multiscale simulations of novel additive manufactured continuous fiber-reinforced three-component composite material / A. Zobacheva, A. Nemov, A. Borovkov // *Materials Physics and Mechanics*, 2017, no. 32, pp. 74–82.
 14. Nemov A., Borovkov A., Boso D., Schrefler B.A. Finite element simulation of the mechanical behaviour of multilevel composite ITER cables // *Proc. IV European Conf. on Computational Mechanics (ECCM)*. Paris, France, 2010.
 15. Nemov A.S., Boso D.P., Voynov I.B., Borovkov A.I., Schrefler B.A. Generalized stiffness coefficients for ITER superconducting cables, direct FE modeling and initial configuration // *Cryogenics*, 2010, Volume 50, Issue 5, 304 – 314.
 16. Новожилов Ю.В., Михалюк Д.С., Боровков А.И. Конечно-элементное моделирование пространственного напряженного состояния прошитого композита // *Материалы лучших докладов Всероссийской межвузовской научной конференции XXXVII Неделя Науки СПбГПУ*. – СПб., Изд-во СПбГПУ, 2009. 75 – 77.
 17. Nemov A., Borovkov A., Schrefler B. Finite Element Modeling of the ITER Superconducting Cables Mechanical Behavior Using LS-DYNA Code // *Proc. 7th European LS-DYNA Conference*. 2009, Salzburg, Austria, 9p.
 18. Novozhilov Yu.V., Mikhaluk D.S., Borovkov A.I., Gilyov E.E., Kemppinen M., Dufva K., Karttunen T., Koulu J. Simulation and Testing of Stitched Glassfibre Laminates Fatigue Behaviour // *Proc. 17th Int. Conf. on Composite Materials*. 2009, Edinburgh, UK, paper A7:9, 9 p. Abstract
 19. Немов А.С., Боровков А.И. Метод многоуровневой гетерогенизации для композитных сред с произвольной анизотропией // *XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Часть V. – С. 53–54.*
 20. Немов А.С., Боровков А.И. Метод многоуровневой гомогенизации для композитных сред с произвольной анизотропией. 2. Процедура многоуровневой гомогенизации // *XXXVIII*

Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Часть V. – С. 51 – 52.

21. Немов А.С., Боровков А.И. Метод многоуровневой гомогенизации для композитных сред с произвольной анизотропией. 1. Гомогенизация анизотропных сред // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Часть V. – С. 49 – 50.
22. Белов Д.А., Боровков А.И. Применение метода «базовых решений» и «регулярных разложений» для нахождения микронапряжений в упругих однонаправленных волокнистых композитах // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Часть V. – С. 43 – 44.
23. Белов Д.А., Боровков А.И. Гомогенизация упругих стохастических однонаправленных волокнистых композитов // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Часть V. – С. 41 – 42.
24. Немов А.С., Боровков А.И., Шрефлер Б.А. Многоуровневая гомогенизация кабелей с иерархической композитной структурой // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2009. № 3. 153 – 162.
25. Боровков А.И., Алеман Меца Д. Гомогенизация однонаправленных волокнистых и гранулированных упругих композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2009. № 3. 135 – 153.
26. Aleman-Meza D., Borovkov A.I. Finite Modeling and Comparative Analysis of Effective Elastic Properties of Composites. 1. Homogenization Methods. Applied Mechanics in the Americas. Vol.12. Proc. Tenth Pan American Congress of Applied Mechanics (PACAM X). Ed. Th. Attard. Cancun, Mexico. 2008. 353-356.
27. Aleman-Meza D., Borovkov A.I. Finite Modeling and Comparative Analysis of Effective Elastic Properties of Composites. 2. Fiber Reinforced Composites. Applied Mechanics in the Americas. Vol.12. Proc. Tenth Pan American Congress of Applied Mechanics (PACAM X). Ed. Th. Attard. Cancun, Mexico. 2008. 33-36.
28. Aleman-Meza D., Borovkov A.I. Finite Modeling and Comparative Analysis of Effective Elastic Properties of Composites. 3. Granulated Composites. Applied Mechanics in the Americas. Vol.12. Proc. Tenth Pan American Congress of Applied Mechanics (PACAM X). Ed. Th. Attard. Cancun, Mexico. 2008. 37-40.
29. Mikhalkuk D.S., Truong T.C., Borovkov A.I., Lomov S.V., Verpoest I. Experimental Observations and Finite Element Modelling of Damage Initiation and Evolution in Carbon/Epoxy Non-Crimp Fabric Composites. Engineering Fracture Mechanics. Volume 75, Issue 9. 2008. 2751-2766.
30. Белов Д.А., Боровков А.И., Пальмов В.А. Новый метод восстановления микронапряжений в гомогенизированных композитах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2008. № 4. 50 – 57.

31. Белов Д.А., Боровков А.И. Метод «локальных гетерогенизаций» для восстановления микронапряжений в композитах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2008. № 4. 27 – 37.
32. Немов А.С., Войнов И.Б., Боровков А.И. Расчетное определение жесткостных характеристик кабелей с иерархической структурой // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2008. № 4. 21 – 27.
33. Боровков А.И., Пальмов В.А. Шесть фундаментальных проблем в механике упругих композитов и гомогенизация // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2008. № 4. 27 – 37.
34. Боровков А.И., Клявин О.И., Клявин О.В., Никифоров А.В., Пальмов В.А. Прогнозирование прочностных свойств композитов на основе изучения механофизических процессов пластической деформации модельных слоистых монокристаллов. Часть 1. Натурный эксперимент // Физическая мезомеханика. 2007. т.10. № 6. 95 – 99.
35. Боровков А.И., Клявин О.И., Клявин О.В., Никифоров А.В., Пальмов В.А. Прогнозирование прочностных свойств композитов на основе изучения механофизических процессов пластической деформации модельных слоистых монокристаллов. Часть 2. Вычислительный эксперимент // Физическая мезомеханика. 2007. т.10. № 6. 89 – 94.
36. Klimshin D.V., Shanina A.S., Borovkov A.I., Lomov S.V., Verpoest I., Macro-criterion and multi-level analysis of damage in fibre reinforced composites under complex 3D loading conditions // Proc. Texcomp-8, 8th Int. Symp. in Textile Composites, 2006, Nottingham, UK
37. Боровков А.И., Пальмов В.А. Базовые решения и регулярное разложение в механике периодических композитов // Труды СПбГТУ, № 498. Вычислительная математика и механика. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2006. 73 – 97.
38. Palmov V.A., Borovkov A.I. Six Fundamental Boundary Value Problems in the Mechanics of Periodic Composites // Applied Mechanics and Materials, Vols. 5-6, 2006. 551 – 558.
39. Borovkov A.I., Palmov V.A. Basic Solutions and Regular Expansion in the Mechanics of Periodic Composites // XXXIII Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics», Book of Abstract, St.Petersburg (Repino), Russia. 2005. p. 29
40. Mikhaluk D.S., Truong T.S., Vettory M., Borovkov A.I., Lomov S.V., Verpoest I. Experimental observations and finite element modeling of fracture in non-crimp fabric carbon/epoxy composites // Proc. Euromech 473 'Fracture of Composite Materials', 2005, Porto, Portugal
41. Боровков А.И., Меркушев В.В. Конечно-элементное моделирование и исследование эффективных упругих характеристик композитов с моноклинной структурой // Труды Шестой Межд. конф. «Математическое моделирование физических, технических, экономических, социальных систем и процессов». – Ульяновск: УлГУ, 2005. 149 – 152.
42. Borovkov A.I., Klimshin D.V., Shevchenko D.V. Finite Element Determination of Critical Zones in Composite Structures // Proc. 11th Int. ANSYS'2004 Conf. "Profiting from Simulation: Business and Technical Leadership Through Simulation-Driven Design". Pittsburgh, PA, USA.

2004. 20 p.

43. Borovkov A.I., Palmov V.A. Basic Solutions in the Problem of Homogenization of Periodic Composites // Proc. 8th Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'2004). A. Melker, Ed., Proc. of SPIE. Vol. 5831. Washington. USA. 2004. 155 – 166.
44. Avdeev I., Borovkov A.I., Kiylo O.L., Lovell M.R., Onipede D. Mixed 2D and beam formulation for modeling sandwich structures // Int. J. Engineering Computations. V.19 (4). 2002. 451–466.
45. Lomov S.V., Verpoest I., Kondratiev S.V., Borovkov A.I. An Integrated Model Strategy for Proceeding and Properties of Textile Composites: New Results // Proc. 22nd Int. SAMPE Europe Conf. of the Society for Advancement of Materials and Process Engineering. G.R. Griffiths, R.F.J. McCarthy, Eds. Paris. France. 2001. 379–389.
46. Боровков А.И., Пальмов В.А. Конечно-элементная механика и компьютерный инжиниринг на рубеже веков. Современное состояние и перспективы развития // Труды XIX межд. конф. "Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов" (BEM&FEM'2001). Т.1. С.-Петербург. Россия. 2001. 8–9.
47. Borovkov A.I., Kiylo O.L., Avdeev I.V. Edge effects in beam sandwich structures finite element modeling // Proc. 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). A. Melker, Ed., Proc. of SPIE. Vol. 4064. Washington. 2000. 401–409.
48. Borovkov A., Misnik Yu., Grodinskaya E.G., Kondratiev S.V., Mikhaliuk D.S. Subinterface and interface cracks in composites. Finite element computations of brittle fracture parameters // Proc. 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). A. Melker, Ed., Proc. of SPIE. Vol. 4064. Washington. 2000. 392–400.
49. Баничук Н.В., Саурин В.В., Боровков А.И., Пальмов В.А., Бартольд Ф.-Й., Штайн Э. Оптимизация формы слоистых конструкций при прочностных ограничениях, обусловленных межслойным разрушением // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 62. Изд-во Нижегородского университета. Нижний Новгород. 2000. 19–30.
50. Borovkov A.I., Palmov V.A., Banichuk N.V., Stein E., Saurin V.V., Barthold F.-J. Macro-Failure Criterion for the Theory of Laminated Composite Structures with Free Edge Delaminations // Int. J. Computers & Structures. V.76 (1–3) 2000. 195–204.
51. Borovkov A.I., Palmov V.A., Banichuk N.V., Stein E., Saurin V.V., Barthold F.-J.; Misnik Yu.Yu. Finite Element Modelling and Structural Optimization based on Macro-Failure Criterion for Laminated Composite Structures with Free Edge // Int. J. Computational Civil and Structural Engineering. V.1, Issue 1, 2000. 91 –104.
52. Borovkov A., Kiylo O., Misnik Yu. Finite Element Fracture Analysis of Multiple Free Edge Delaminations. 2. Capped and Stitched Laminates // Abstr. Annual GAMM Conf. Metz. France. 1999. P.37–38.

53. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Fracture Analysis of Multiple Free Edge Delaminations. 1. Critical Stresses // Abstr. Annual GAMM Conf. Metz. France. 1999. P.37.
54. Borovkov A., Avdeev I., Artemyev A. Refined Finite Element Modelling of Laminated Beams // Abstr. Annual GAMM Conf. Metz. France. 1999. P.37.
55. Borovkov A. Finite Element Multiscale Homogenization and Sequential Heterogenization of Composite Structures // Abstr. Annual GAMM Conf. Metz. France. 1999. P.37.
56. Borovkov A.I., Avdeev I.V., Kiylo O.L. Edge effects in beam sandwich structures finite element modeling // Preprints 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). St.Petersburg. Russia. 1999. H14-H15.
57. Borovkov A., Misnik Yu., Grodinskaya E.G., Kondratiev S.V., Mikhaleuk D.S. Subinterface and interface cracks in composites. Finite element computations of brittle fracture parameters // Preprints 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). St.Petersburg. Russia. 1999. H12-H13.
58. Borovkov A.I., Misnik Yu.Yu. Interaction of multiple edge delaminations in laminated composite structures // Preprints 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). St.Petersburg. Russia. 1999. H10-H11.
59. Borovkov A.I., Avdeev I.V., Artemyev A.V. Multiparametric finite element analysis of laminated beams // Preprints 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). St.Petersburg. Russia. 1999. H16-H17.
60. Borovkov A.I., Palmov V.A. Locality Principle in Mechanics of Composite Structures // Preprints 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99). St.Petersburg. Russia. 1999. H6-H7.
61. Borovkov A., Palmov V.A., Banichuk N.V., Saurin V.V., Barthold F.-J., Stein E. Formulation of Macro-Failure Criterion for the Robust Design and Optimization of Laminated Composite Structures with Free Edge Delaminations. In: Adaptive Methods for Structural Analysis and Structural Optimization of Composites. Eds. E. Stein, N.V. Banichuk, V.A. Palmov. Institute for Structural and Computational Mechanics. Hannover University. Germany. 1999. 203-250.
62. Borovkov A., Misnik Yu., Palmov V.A. Formulation of Macro-Failure Criterion and Advanced Finite Element Modeling of Laminated Composite Structures with Free Edge Delaminations. In: Adaptive Methods for Structural Analysis and Structural Optimization of Composites. Eds. E. Stein, N.V. Banichuk, V.A. Palmov. Institute for Structural and Computational Mechanics. Hannover University. Germany. 1999. 16-97.
63. Borovkov A., Avdeev I., Artemyev A. Finite Element Stress, Vibration and Buckling Analysis of Laminated Beams with the Use of Refined Elements // Proc. 2nd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'98). A. Melker, Ed., Proc. of SPIE. Vol. 3687. Washington. USA. 1999. Section Methods of Continuum and Computational Mechanics. 455-464.
64. Borovkov A., Misnik Yu. New Approach to Mathematical and Finite Element Modeling of

- Delaminations in Multidirectional Multilayered Laminated Composite Structures. 2. Numerical Examples // Proc. 2nd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'98). A. Melker, Ed., Proc. of SPIE. Vol. 3687. Washington. USA. 1999. Section Methods of Continuum and Computational Mechanics. 445-454.
65. Borovkov A., Misnik Yu. New Approach to Mathematical and Finite Element Modeling of Delaminations in Multidirectional Multilayered Laminated Composite Structures. 1. Fracture Criteria and Finite Element Algorithm // Proc. 2nd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'98). A. Melker, Ed., Proc. of SPIE. Vol. 3687. Washington. USA. 1999. Section Methods of Continuum and Computational Mechanics. 437-444.
 66. Borovkov A.I., Kiylo O.L., Misnik Yu. et al. Finite Element Stress and Fracture Analysis of the Multidirectional Laminated Composite Structures. 2. h-p-Refinement and m-Adaptive Procedures // Appl.Math.Mech. (Z.Angew. Math.Mech. – ZAMM). V.79. 1999. S527-S528.
 67. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Stress and Fracture Analysis of Multidirectional Laminated Composite Structures. 1. Heterogenization and New 3D Models // Appl.Math.Mech. (Z.Angew.Math.Mech. – ZAMM). V.79. 1999. S525-S526.
 68. Borovkov A.I., Kiylo O., Bondarchuk E. et al. Three Dimensional Numerical Structural Analysis of the ITER Magnet System at Fault Event // Plasma Devices and Operations. 1999. V.7. 1-9.
 69. Боровков А.И., Мисник Ю.Ю. Новая математическая модель и алгоритм исследования межслойных эффектов в композитах со сложной микроструктурой // Материалы научн.-техн. конф. "Фундаментальные исследования в технических университетах". С.-Петербург. Изд. СПбГТУ. 1998. 47-48.
 70. Боровков А.И., Авдеев И.В., Артемьев А.В. Конечно-элементное решение задач статики, колебаний и устойчивости многослойных стержней // Материалы научн.-техн. конф. "Фундаментальные исследования в технических университетах". С.-Петербург. Изд. СПбГТУ. 1998. 42-43.
 71. Borovkov A., Avdeev I., Artemyev A. Finite Element Stress and Vibration Analysis of Sandwich and Multilayered Beams // Sandwich Construction – IV. Vol.1. Ed.K.-A.Olsson. U.K.: EMAS Publishing. 1998. 303-314.
 72. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Stress and Fracture Analysis of Sandwich and Multilayered Composite Structures // Sandwich Construction – IV. Vol.1. Ed.K.-A.Olsson. U.K.: EMAS Publishing. 1998. 291-302.
 73. Borovkov A., Palmov V., Banichuk N. et al. Macro-Failure Criterion for the Theory of Laminated Composite Structures with Free Edge Delaminations // NATO Advanced Study Institute on Mechanics of Composite Materials and Structures. V.5. Invited and Contributed Papers. Eds. Carlos A. Mota Soares et al. 1998. Troia. Portugal. 1-28.
 74. Borovkov A., Palmov V. Locality Principle in Mechanics of Composite Structures // Abstr. Annual GAMM Conf. Bremen. Germany. 1998. P.18.

75. Borovkov A., Kiylo O., Misnik Yu. et al. Finite Element Stress and Fracture Analysis of the Multidirectional Laminated Composite Structures. 2. h-p-m- Adaptive Analysis // Abstr. Annual GAMM Conf. Bremen. Germany. 1998. P.18.
76. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Stress and Fracture Analysis of Multidirectional Laminated Composite Structures. 1. Heterogenization and New 3D Models // Abstr. Annual GAMM Conf. Bremen. Germany. 1998. P.18.
77. Borovkov A., Avdeev I., Artemyev A. Finite Element Stress, Vibration and Buckling Analysis of Laminated Beams // Preprints 2nd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'98). St.Petersburg. Russia. 1998. H8d.
78. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Stress and Fracture Mechanics of Laminated Composite Structures. 2. New Three-Dimensional Models and Results // Preprints 2nd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'98). St.Petersburg. Russia. 1998. H8c.
79. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Stress and Fracture Mechanics of Laminated Composite Structures. 1. Methods, Fracture Criteria and New Algorithm // Preprints 2nd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'98). St.Petersburg. Russia. 1998. H8b.
80. Borovkov A., Avdeev I., Artemyev A. Finite Element Stress and Vibration Analysis of Sandwich and Multilayered Beams // Proc. 4th Int. Conf. Sandwich Construction. Stockholm. Sweden. V.1. 1998. 418-429.
81. Borovkov A., Misnik Yu. Finite Element Stress and Fracture Analysis of Sandwich and Multilayered Composite Structures // Proc. 4th Int. Conf. on Sandwich Construction. Stockholm. Sweden. V.1. 1998. 406-417.
82. Borovkov A.I., Grodinsky K., Klysh A. et al. Local Finite Element Stress Analysis of the International Thermonuclear Experimental Reactor Central Solenoid // Plasma Devices and Operations. 1998. V.6. 149-157.
83. Borovkov A.I., Kiylo O.L., Panin A.G. Finite Element Modelling and Stress Analysis of Composite Structures of the ITER Electromagnetic System // Appl.Math.Mech. (Z.Angew.Math.Mech. – ZAMM). V.78. Suppl. 1. 1998. S293-294.
84. Borovkov A.I., Klich A.E. Computational Micromechanics of Composites. Finite Element Homogenization Methods // Appl.Math.Mech. (Z.Angew.Math.Mech. – ZAMM). V.78. Suppl. 1. 1998. S295-S296.
85. Krivchenkov Y., Stoner J., Borovkov A.I. et al. Stress Variation in the Winding Pack of an ITER Central Solenoid Configuration // Proc. 15 th Int. Conf. on Magnet Technology (MT-15). Eds. L. Liangzhen, S. Guoliao, Y. Luguang. China. Science Press. 1997. 1319-1322.
86. Borovkov A.I., Kiylo O.L., Panin A.G. et al. Local Finite Element Structural Analysis of the ITER Central Solenoid // Abstr. 15 th Int. Conf. on Magnet Technology. China. 1997.
87. Borovkov A.I., Kiylo O.L., Panin A.G. Three-Dimensional Finite Element Stress Analysis of

- Composite Structures of the ITER Superconducting Electromagnetic System under Fault Conditions // Abstr. 15th Int. Conf. on Magnet Technology (MT-15). China. 1997. P.19.
88. Borovkov A.I. Finite Element Methods of Homogenization and Heterogenization for Thermal and Stress Analyses of Superconducting Magnet System // Abstr. 15th Int. Conf. on Magnet Technology (MT-15). China. 1997. P.19.
 89. Bondarchuk E., Borovkov A.I., Kiylo O. et al. Fully Three-Dimensional Finite Element Stress Analysis of the ITER Magnet System under Fault Conditions // Abstr. VI All-Russian Conf. "Engineering Problems of Thermonuclear Reactors". St.Petersburg. Russia. 1997. P.117.
 90. Borovkov A.I., Grodinsky K.G., Nikulina L.V. et al. Local Finite Element Stress Analysis of the ITER Central Solenoid // Abstr. VI All-Russian Conf. "Engineering Problems of Thermonuclear Reactors". St.Petersburg. Russia. 1997. P.97.
 91. Titus P.H., Panin A.G., Borovkov A.I. Evaluation of Insulation Shear Stresses in the ITER Central Solenoid // Proc. 17th IEEE/NPSS Symp. on Fusion Engineering (SOFE'97). San Diego. USA.1997. V.2. 689-692.
 92. Боровков А.И. Конечно-элементная термомеханика композитных структур сверхпроводящих магнитных систем // III научн.-техн. сем. "Актуальные проблемы прочности материалов конструкций при низких температурах". Тез. докл. СПб. 1997. 35-40.
 93. Боровков А.И., Клыш А.Е. Сравнительный анализ метода асимптотического осреднения и метода прямой гомогенизации в задачах определения эффективных характеристик волокнистых композитов // "Механика симметричных неоднородных сред и ее приложения". Одесса. Украина. 1997. 31-37.
 94. Titus, P.H.; Panin, A.; Borovkov, A.I. Evaluation of insulation shear stresses in the ITER central solenoid // Fusion Engineering, 1997. 17th IEEE/NPSS Symposium Vol. 2, 1997, 689-692
 95. Borovkov A.I., Semenov A.S. Computational Thermomechanics of the Divertor Target Composite Structures of the ITER. Part II: Thermo-Elasto-Plastic Analysis // Appl.Math.Mech. (Z.Angew.Math.Mech. – ZAMM). V.77. Suppl. 2. 1997. S523-S524.
 96. Borovkov A.I., Nikulina L.V., Grodinsky K.G. et al. Computational Thermomechanics of the Divertor Target Composite Structures of the ITER. Part I: Thermal Analysis // Appl.Math.Mech. (Z.Angew.Math.Mech. – ZAMM). V.77. Suppl. 2. 1997. S521-S522.
 97. Borovkov A.I. Finite Element Macro- and Micromechanics of the Complex Composite Structures // Abstr. 3rd EUROMECH Solid Mechanics Conf. Stockholm. Sweden. 1997. P.57.
 98. Боровков А.И., Ерофеев С.А. Конечно-элементное решение двумерных задач электроупругости анизотропных сред // 7-й Межд. сем. по физике сегнетоэлектриков-полупроводников. Тез. докл. Ростов-на-Дону. 1996. 207-208.
 99. Боровков А.И. Вычислительная механика композитных структур термоядерных реакторов // XIV Межд. конф. "Методы потенциала и конечных элементов в автоматизированных исследованиях инженерных конструкций". Тез. докл. СПб. 1996. 18-21.

100. Borovkov A.I., Nikulina L., Shiryayev P. et al. ITER Central Solenoid Prototype Sample Design and Three Dimensional Finite Element Modeling // IEEE Transactions on Magnetics. 1996. V.32. N 4. 2982-2985.
101. Ledentsov N.N., Alferov Zh.I., Borovkov A.I. et al. Direct Formation of Vertically Coupled Quantum Dots in Stranski-Krastanow Growth // Physical Review. B. V.54. N12. 1996. 8743-8750.
102. Боровков А.И., Шукин В.А. Применение теории упругости гетерогенных анизотропных сред и конечно-элементного моделирования для исследования процессов самоорганизации наноструктур // Российская научно-техн. конф. "Инновационные наукоемкие технологии для России". Тез. докл. СПб. 1995. С.39.
103. Боровков А.И., Никулина Л.В., Данг Суан Шинь. Вычислительная механика разрушения. 2. Конечно-элементное определение коэффициентов интенсивности напряжений в однонаправленных волокнистых композитах // Российская научно-техн. конф. "Инновационные наукоемкие технологии для России". Тез. докл. СПб. 1995. С.38.
104. Боровков А.И., Никулина Л.В., Данг Суан Шинь. Вычислительная механика разрушения. 1. Конечно-элементное определение коэффициентов интенсивности напряжений в слоистых композитах // Российская научно-техн. конф. "Инновационные наукоемкие технологии для России". Тез. докл. СПб. 1995. С.37.
105. Боровков А.И., Ширяев П.М., Данг Суан Шинь. Конечно-элементное определение эффективных термоупругих характеристик двунаправленных тканых композитов // Российская научно-техн. конф. "Инновационные наукоемкие технологии для России". Тез. докл. СПб. 1995. С.36.
106. Боровков А.И., Ширяев П.М., Уткин С.Л. Конечно-элементное определение эффективных термоупругих характеристик пространственных гранулированных композитов // Российская научно-техн. конф. "Инновационные наукоемкие технологии для России". Тез. докл. СПб. 1995. С.35.
107. Боровков А.И., Никулина Л.В., Данг Суан Шинь. Конечно-элементное определение эффективных упругих и теплофизических характеристик сверхпроводящих центрального соленоида и обмотки тороидального поля термоядерной установки ITER // Российская научно-техн. конф. "Инновационные наукоемкие технологии для России". Тез. докл. СПб. 1995. С.34.
108. Borovkov A.I., Dang S.S., Korsunsky V.E. et al. 2D & 3D Finite Element Modeling in Support for the ITER Central Solenoid Design // Abstr. Int. Conf. "Optimization of Finite Element Approximation" (OFEA'95). St. Petersburg. Russia. 1995. P.104.
109. Borovkov A.I. Finite Element Mechanics of Complex Macro- and Microheterogeneous Composite Structures // Abstr. Int. Conf. "Optimization of Finite Element Approximation" (OFEA'95). St.Petersburg. Russia. 1995. 38-39.
110. Borovkov A.I., Korsunsky V.E., Nikulina L.V. et al. ITER Central Solenoid Prototype Sample Design and Three Dimensional Finite Element Modeling // Abstr. XIV Int. Conf. on Magnet Technology (MT-XIV). Tampere. Finland. 1995. P.31.

111. Bondarchuk E.N., Borovkov A.I., Panin A.G. et al. Three Dimensional Finite Element Stress Analysis of the ITER Electromagnetic System Composite Structure under Fault Conditions // Abstr. XIV Int. Conf. on Magnet Technology (MT-XIV). Tampere. Finland. 1995. P.31.
112. Borovkov A.I., Nikulina L.V., Shiryaev P.M. Computational Mechanics of Macro- and Microheterogeneous Composite Structures // Abstr. IX Int. Conf. on Mechanics of Composite Materials. Riga. Latvia. 1995. P.158.
113. Shchukin V.A., Borovkov A.I., Ledentsov N.N. et al. Stress-Induced Formation of Ordered Nanostructures on Crystal Surfaces // Physics of Low-Dimensional Structures. V.12. 1995. 43-50.
114. Shchukin V.A., Borovkov A.I., Ledentsov N.N. et al. Theory of Quantum-Wire Formation on Corrugated Surfaces // Physical Review B. V.51. N 24. 1995. 17767-17779.
115. Shchukin V.A., Borovkov A.I., Ledentsov N.N. et al. Tuning and Breakdown of Faceting under Externally Applied Stress // Physical Review B. V.51. N 15. 1995. 10104-10118
Shchukin V.A., Borovkov A.I., Ledentsov N.N. et al. Theory of Self-Organized GaAs/AlAs Quantum Wires on Corrugated Surface // Abstr. XVI Pecar Int. Conf. of Theory of Semiconductors. Odessa. Ukraine. 1994. 22-23.
116. Shchukin V.A., Borovkov A.I. On the Possibility to Control Parameters Spontaneously Formed Nanostructures / Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Abstr. of Invited Lectures and Contributed Papers. St.Petersburg. Russia. 1994. 227-230.
117. Borovkov A.I. Computational Mechanics of Composite Structures // Abstr. Annual Scientific Conf. GAMM'94. Braunschweig. Germany. 1994. P.64.
118. Shchukin V.A., Borovkov A.I., Ledentsov N.N. et al. Theory of GaAs/AlAs-quantum Wire Formation on Corrugated Surfaces // Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Abstr. of Invited Lectures and Contributed Papers. St.-Petersburg. Russia. 1993. 102-103.
119. Borovkov A.I., Ilyin P., Krivchenkov Yu. et al. Finite Element Analysis of Effective Mechanical and Thermal Characteristics of Micro Heterogeneous Superconducting Toroidal Field Coils // IEEE Transactions on Magnetics. 1992. V.28. N 1. 927-930.
120. Borovkov A.I., Ilyin P., Shiryaev P. et al. Three Dimensional Finite Element Stress Analysis of Different Designs of Superconducting Toroidal Field Coils for the International Thermonuclear Experimental Reactor // IEEE Transactions on Magnetics. 1992. V.28. N 1. 247-250.
121. Боровков А.И., Ильин П.В., Пальмов В.А. Конечно-элементное решение статических и динамических двумерных задач механики композитов и механики разрушения // Труды I Всес. конф. "Технологические проблемы прочности несущих конструкций". Т.1. Ч.1. Запорожье. 1991. 40-45
122. Borovkov A.I., Ilyin P., Krivchenkov Yu. et al. Finite Element Evaluation of Thermoelastic Characteristics of Micro Heterogeneous Toroidal Field Superconductor Coils // Abstr. XII Int. Conf. on Magnet Technology (MT-XII). Leningrad. USSR. 1991. P.377.
123. Borovkov A.I., Ilyin P., Shiryaev P. et al. 3D Finite Element Stress Analysis

of ITER Superconductor Toroidal Field Coil // Abstr. XII Int. Conf. on Magnet Technology (MT-XII). Leningrad. USSR. 1991. P.67.

124. Боровков А.И., Ширяев П.М., Львов В.Б. и др. Конечно-элементное решение трехмерных задач теории упругости гетерогенных анизотропных сред // "Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела". Ч. 1. Харьков. 1989. 38-40.
125. Боровков А.И., Елисеев В.В. Определение эффективных физико-механических свойств композиционных материалов // Труды ЛПИ. № 425. "Механика и процессы управления". 1988. 65-70.
126. Боровков А.И. Эффективные физико-механические свойства волокнистых композитов. – М.: Изд-во ВИНТИ. 1985. – 113 с.
127. Боровков А.И., Ильин П.В., Ширяев П.М. и др. Конечно-элементное исследование пространственного напряженного состояния сверхпроводящей обмотки тороидального поля установки ИТЭР // V Всес. конф. по инж. проблемам термоядерных реакторов. Тез. докл. Л. 1990. 87-88.
128. Боровков А.И., Ширяев П.М., Львов В.Б. и др. Конечно-элементное решение трехмерных задач теории упругости гетерогенных анизотропных сред // "Эффективные численные методы решения краевых задач механики твердого деформируемого тела". Ч. 1. Харьков. 1989. 38-40.
129. Боровков А.И., Елисеев В.В. Определение эффективных физико-механических свойств композиционных материалов // Труды ЛПИ. № 425. "Механика и процессы управления". 1988. 65-70.
130. Боровков А.И., Елисеев В.В., Пальмов В.А. Расчет допустимой по прочности скорости охлаждения соленоида // Всес. научн.-техн. конф. "Научные пробл. совр. энергетического машиностроения и их решение". Тез. докл. Л. 1987. С.175.
131. Боровков А.И., Елисеев В.В., Спирченко Ю.В. Температурные напряжения в некруговых соленоидах в режиме циркуляционного охлаждения // IV Всес. конф. по инж. пробл. термоядерных реакторов. Тез. докл. М.: ЦНИИАтоминформ, 1987. 114-115.
132. Боровков А.И., Елисеев В.В., Пальмов В.А. и др. Моделирование и конечно-элементное исследование теплового и напряженного состояния сверхпроводящих электромагнитных систем в режиме циркуляционного охлаждения // IV Всес. конф. по инж. проблемам термоядерных реакторов. Тез. докл. М.: ЦНИИАтоминформ, 1987. 108-109.
133. Боровков А.И. Эффективные физико-механические свойства волокнистых композитов – М.: Изд-во ВИНТИ. 1985. – 113 с.

ГЛОССАРИЙ

Автоматизированная система	– Система, состоящая из комплекса средств автоматизации, реализующего информационную технологию выполнения установленных функций, и персонала, обеспечивающего его функционирование [ГОСТ Р 59853–2021]. Примечания: 1 В зависимости от вида деятельности выделяют, например, следующие виды АС: автоматизированные системы управления (АСУ), системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) и др. 2 В зависимости от вида управляемого объекта (процесса) АСУ подразделяют, например, на АСУ технологическими процессами (АСУТП), АСУ предприятиями (АСУП) и т. д.
Адекватность модели	– Соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик [ГОСТ Р 57700.37–2021]. Примечание. Факторы, влияющие на разработку цифровых моделей высокого уровня адекватности изделия: квалифицированные кадры (инженеры); технологии: высокопроизводительные вычислительные системы; сроки; финансирование.
Валидация (validation)	– Подтверждение (на основе представления объективных свидетельств) того, что заданные требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены [ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207:2010]. Примечание. Валидация в контексте жизненного цикла представляет собой совокупность действий, гарантирующих и обеспечивающих уверенность в том, что система способна реализовать свое предназначение, текущие и перспективные цели [ГОСТ Р 57269–2016].
Валидация математической модели (mathematical model validation)	– Подтверждение адекватности математической модели моделируемому объекту [ГОСТ Р 57188–2016].
Валидация модели изделия	– Подтверждение адекватности модели моделируемому изделию [ГОСТ Р 57700.37–2021]. Примечания: 1 Валидация модели изделия выполняется для выбранного множества характеристик и заданной степени точности. 2 Определение распространяется на математические, компьютерные, цифровые модели.
Валидация численной расчетной модели	– Процедура подтверждения адекватности численной расчетной модели поведению моделируемого объекта при ударном нагружении [ГОСТ Р 57700.7–2018].

Верификация математической модели (mathematical model verification)	Подтверждение корректности решения уравнений математической модели [ГОСТ Р 57188-2016].
Данные	Информация, обработанная и представленная в формализованном виде для дальнейшей обработки [ГОСТ 7.0-99].
Двусторонние информационные связи	Двусторонний обмен данными и информацией между изделием и его цифровым двойником [Глоссарий ПИШ СПбПУ «Цифровой инжиниринг» [336]].
Достоверность	Качество, характеризующее доверие или убежденность в результатах расчета и моделирования [СТО СИТИС-201-16А].
Жизненный цикл (life cycle)	Жизненный цикл (life cycle): Процесс развития объекта (системы) от зарождения идеи до вывода из эксплуатации. Жизненный цикл некоторых систем может иметь периодический характер [ГОСТ Р 57269-2016]. Примечание – В зависимости от точки зрения участник жизненного цикла объекта видит свое множество состояний, объединенных в стадии. Жизненный цикл изделия, жизненный цикл: 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 [ГОСТ Р 56136-2014]. Стадия жизненного цикла (life cycle stage): Часть жизненного цикла, выделяемая по признакам характерных для нее явлений, процессов (работ) и конечных результатов [ГОСТ Р 56136-2014]. Жизненный цикл: Развитие системы, продукта, услуги, проекта или других изготовленных человеком объектов, начиная со стадии разработки концепции и заканчивая прекращением применения [ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010].
Изделие	Предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению в организации (на предприятии) по конструкторской документации [ГОСТ 2.101-2016]. Примечания: 1 Изделиями могут быть: устройства, средства, машины, агрегаты, аппараты, приспособления, оборудование, установки, инструменты, механизмы, системы и др. 2 Число изделий гложет измеряться в штуках (экземплярах). 3 К изделиям допускается относить завершенные и незавершенные предметы производства, в том числе заготовки.

Испытания	– Экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий [ГОСТ 16504–81]. Примечание. Определение включает оценивание и (или) контроль.
Испытательное оборудование (стенд)	– Средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний [ГОСТ 16504–81].
Испытательный полигон	– Территория и испытательные сооружения на ней, оснащенные средствами испытаний и обеспечивающие испытания объекта в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта [ГОСТ 16504–81].
Качество (quality)	– Степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта-системы требованиям. Примечание – Совокупность всех тех и только тех свойств, которые характеризуют получаемые при потреблении объекта результаты (как желательные, положительные, так и нежелательные, отрицательные), но которые не включают в себя затраты денежных средств на его создание и потребление, т. е. в эту совокупность входят только те свойства, которые связаны с достигаемым при потреблении объекта результатом, но не входят свойства, связанные с обеспечивающими этот результат затратами [ГОСТ Р ИСО 9000:2015].
Компьютерная модель (электронная модель)	– Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными [ГОСТ Р 57700.22–2020]. Примечание. В основе компьютерной модели лежит математическая модель, реализованная в виде программного кода, и данные, определяющие конкретный объект моделирования. Для применения компьютерной модели в процессе моделирования необходимо использовать программное обеспечение компьютерного моделирования и вычислительной техники.
Компьютерная модель изделия	– компьютерная модель, в которой объектом моделирования является изделие(ия) [ГОСТ Р 57412–2017]. Примечание. Компьютерную модель разрабатывают при помощи соответствующих программных средств.
Компьютерное моделирование изделия	– Моделирование, выполненное с использованием компьютерной модели изделия [57412–2017]. Примечание. Компьютерное моделирование изделия выполняют с целью получения данных, необходимых для принятия решений в процессах разработки, проектирования, производства, сопровождения эксплуатации и других задач в ходе жизненного цикла изделия.
Математическая модель (mathematical model)	– Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений [ГОСТ Р 57188–2016].

Математическое моделирование

Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений, отражающих те или иные физические закономерности системы [ГОСТ Р 57700.3–2017].

- Исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения, применения и изучения их математических моделей [ГОСТ Р 57188–2016].

Примечание. Процесс математического моделирования можно разделить на пять этапов: первый – формулирование законов, связывающих основные объекты модели; второй – исследование математических задач, к которым приводит математическая модель; третий – верификация модели; четвертый – валидация модели; пятый – последующий анализ модели в связи с накоплением данных об изучаемых явлениях и модернизация модели.

Метод конечных элементов (МКЭ, Finite Element Method, FEM)

- Сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой [ГОСТ Р 57188–2016].

Многомасштабное моделирование

- Реализация математической модели, являющейся иерархией различных математических моделей, описывающих процессы разного масштаба по переменным фазового пространства (временного, пространственного и т. п.) [ГОСТ Р 57188–2016].

Многоуровневая система требований

- Иерархическая система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования к изделию и его составным частям [ГОСТ Р 57700.37–2021].

Примечания:

1 В процессе создания цифрового двойника требования верхних уровней декомпозируются, в том числе на целевые показатели и ресурсные ограничения для нижних уровней. Достижение целевых показателей и (или) удовлетворение ресурсным ограничениям всех нижних уровней должно обеспечивать удовлетворение требований более высокого уровня.

2 Частным случаем многоуровневой системы требований является многоуровневая матрица требований, включая требования, целевые показатели и ресурсные ограничения.

3 Данные, поступающие от эксплуатируемого изделия, используются для уточнения многоуровневой системы требований, доработки цифровых моделей с целью прогнозирования поведения изделия в различных условиях эксплуатации, оптимизации затрат на техническое обслуживание, ремонт, а также для модернизации изделия.

Модель для испытаний

- Изделие, процесс, явление, математическая модель, находящиеся в определенном соответствии с объектом испытаний и (или) воздействиями на него и способные замещать их в процессе испытаний [ГОСТ 16504–81].

Модельно-ориентированный системный инжиниринг (Model Based Systems Engineering, MBSE) Нагрузки

- Подход, являющийся формализованным применением моделирования для удовлетворения требований и обеспечения проектирования, инженерных расчетов, верификации и валидации системы, начиная со стадии ее концептуального проектирования, далее на протяжении стадии разработки и на последующих стадиях жизненного цикла [336].
- Заданные силовые, кинематические и смешанные функции, действующие на модель, и обусловленные условиями работы [ГОСТ Р 57700.10–2018].

Натурные испытания

- Испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта [ГОСТ 16504–81].

Новые производственные технологии (НПТ)

- Совокупность новых, с высоким потенциалом, но уже зарекомендовавших себя, демонстрирующих де-факто стремительное развитие, но имеющих пока по сравнению с традиционными технологиями относительно небольшое распространение, новых подходов, материалов, методов и процессов, которые используются для проектирования и производства глобально конкурентоспособных и востребованных на мировом рынке продуктов или изделий (машин, конструкций, агрегатов, приборов, установок и т. д.) [ДК «Технет 4.0» (передовые производственные технологии) НТИ].

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.) [336].

Комплекс процессов проектирования и изготовления на современном технологическом уровне кастомизированных (индивидуализированных) материальных объектов (товаров) различной сложности – основанных на комплексе мультидисциплинарных знаний, наукоемких технологий и системы интеллектуальных ноу-хау – в первую очередь цифрового моделирования и проектирования, новых материалов и аддитивных технологий с последующим добавлением к этой цепочке новых технологических элементов – робототехники, сенсорики, Big Data, индустриального Интернета, прочих ППТ, обеспечивающих переход от цифрового (Digital Factory) к «умному» (Smart Factory) и/или виртуальному (Virtual Factory) уровню «фабрики будущего». Ключевыми технологическими направлениями, способствующими обновлению производства, являются: передовые материалы; цифровое моделирование и проектирование, включая бионический дизайн, суперкомпьютерный инжиниринг и оптимизацию; аддитивные и гибридные технологии [ДК «Технет 4.0» (передовые производственные технологии) НТИ].

Передовые технологии компьютерного

- Совокупность технологий компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD), математического моделирования, компьютерного и

проектирования
и моделирования
и технологии
оптимизации

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. [336].

Проверка
адекватности
компьютерной модели

- Совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение ее соответствия моделируемому объекту реального мира [ГОСТ Р 57412–2017].

Средства (системы)
автоматизированного
проектирования (CAD,
САПР)

- САПР: организационно-техническая система, входящая в структуру проектной организации и осуществляющая проектирование при помощи комплекса средств автоматизированного проектирования (КСАП) [ГОСТ 23501.101–87].

Системы автоматизированного проектирования: Прикладные автоматизированные системы, используемые для проектирования, геометрического моделирования и параметрического проектирования. Используются для создания конструкторской и технологической документации, 3D моделей, чертежей [2].

Средства автоматизированного проектирования: Программное обеспечение, которое должно предоставлять возможность автоматизированного проектирования, которое должно позволять создавать конструкторскую и технологическую документацию [1].

Средства (системы)
инженерного
анализа (CAE)

- Средства инженерного анализа: Программное обеспечение, которое должно предоставлять возможность оценки жизнеспособности компьютерных моделей [1].

Системы инженерного анализа: Программные системы, 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 на разных эксплуатационных режимах и в разных условиях эксплуатации с учетом внешних воздействий [2].

Средства (системы)
управления
жизненным циклом
изделия (PLM)

- Средства управления жизненным циклом изделия: Программное обеспечение, которое должно предоставлять возможность информационной поддержки изделий на протяжении всех этапов их жизненного цикла [1].

Системы управления жизненным циклом изделия позволяют реализовать стратегический подход к ведению бизнеса, который использует набор совместимых технических решений для поддержки общего (коллаборативного) представления информации о продукте в процессе его создания, реализации и эксплуатации, в среде расширенного предприятия – начиная от концепции создания продукта и заканчивая его утилизацией – при интеграции людских ресурсов, процессов и информации [2].

Жизненный цикл изделия, жизненный цикл: 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 [ГОСТ Р 56136-2014].

Жизненный цикл: Развитие системы, продукта, услуги, проекта или других изготовленных человеком объектов, начиная со стадии разработки концепции и заканчивая прекращением применения [ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010].

Средства (системы)
управления
инженерными
данными
об изделии (PDM)

- **Средства управления инженерными данными об изделии:** Программное обеспечение, которое должно обеспечивать управление всей информацией об изделии либо сложных технических объектах [1].

Система управления данными об изделии: Информационная система, обеспечивающая накопление, хранение и сопровождение данных и документов об изделии, а также их предоставление заинтересованным лицами в соответствии с заданными правами доступа [ГОСТ Р 56136-2014].

Системы управления данными об изделии включают программное обеспечение, позволяющее управлять данными об изделии, включая сохранение данных об изделии в базах данных (прежде всего инженерных данных, таких как CAD-модели и чертежи, цифровые макеты (DMU), спецификации материалов (BOM) и др.). Метаданные содержат информацию о создателе файла и текущем статусе соответствующего компонента. Система PDM позволяет организовать совместный доступ к этим данным, обеспечивая их постоянную целостность, вносить необходимые изменения во все версии изделия, модифицировать спецификацию материалов, помогать конфигурировать варианты изделия. Система PDM в качестве интегрирующей подсистемы используется на протяжении всего жизненного цикла изделия в рамках концепции управления этим циклом (PLM). PDM-системы позволяют одновременно работать с инженерными данными, полученными от систем CAD, CAE, CAM и иных [2].

Автоматизированная система управления данными об изделии: Автоматизированная система, обеспечивающая создание (разработку), получение, хранение, преобразование, сопровождение конструкторских, технологических, производственных, эксплуатационных и других данных об изделии и их предоставление потребителям в соответствии с установленными правилами [ГОСТ Р 2.005-2023].

Средства (системы)
управления
оборудованием
с числовым
программным
управлением (CAM)

- **Средства управления оборудованием с числовым программным управлением:** Программное обеспечение (модули), которое должно быть предназначено для подготовки управляющих программ для станков с числовым программным управлением [1].

Системы автоматизации изготовления/производства: Класс автоматизированных систем для автоматизации расчета обработки изделий на станках с числовым программным управлением [2].

Автоматизированное производство: Компьютерные системы, которые используются для программирования станков с ЧПУ (числовым программным управлением) [ГОСТ Р ИСО 16100-1-2012].

Средства управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM)	Программное обеспечение системы числового программного управления станком: Совокупность программ и документации на них для реализации целей и задач системы числового программного управления станком [ГОСТ 20523-80]. Система числового программного управления станком: Совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление станком [ГОСТ 20523-80]. Числовое программное управление станком (ЧПУ): Управление обработкой заготовки на станке по управляющей программе, в которой данные заданы в цифровой форме [ГОСТ 20523-80]. – Среда (платформа), которая позволяет эффективно управлять конфигурацией данных моделирования, оптимизировать процессы, осуществлять совместную работу глобально распределенных команд, обеспечивать прозрачность и прослеживаемость и принимать решения по оптимизации продукта/ изделия. Такие системы связывают входные и выходные данные программ пре-процессинга, систем конечно-элементного анализа и программ обработки результатов вычислений (постпроцессинга), повышая степень автоматизации, обеспечивая прослеживаемость цифровых испытаний и улучшая процесс математического и компьютерного моделирования [1]. SPDM-системы позволяют обеспечить прозрачность и контролируемость процесса разработки, принятие обоснованных решений; упрощают работу с результатами цифровых испытаний, включая цифровые испытания на цифровых испытательных стендах и полигонах, а также формирование отчетов.
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 [336].
Технологическое лидерство	– Превосходство технологий и (или) продукции по основным параметрам (функциональным, техническим, стоимостным) над зарубежными аналогами [280].
Технологический суверенитет	– 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. Технологический суверенитет обеспечивается в 2 основных формах – исследования, разработка и внедрение критических и сквозных технологий (по установленному перечню) и производство высокотехнологичной продукции, основанного на указанных технологиях. Технологический суверенитет

Требование (requirement)

обеспечивается в том числе с опорой на устойчивое международное научно-техническое сотрудничество с дружественными странами [280].

Требуемая (ожидаемая) количественная или качественная характеристика или свойство объекта, а также связанные ограничения и условия [ГОСТ Р 59194–2020].

Примечание – К требованиям также относятся целевые показатели – величины контролируемых параметров, необходимые для удовлетворения требований к изделию с заданной точностью.

Потребность или ожидание, которое установлено потребителем, обычно предполагается или является обязательным. Обычно оформляется в виде документа, передающего критерии, которые необходимо выполнить в случае заявления о соответствии данному документу и отклонение от которых недопустимо [ГОСТ Р 57269–2016].

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 [ГОСТ Р 57700.37–2021].

Примечания:

1 Цифровая модель создается с использованием ПО КМ 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, которые установлены в соответствующих технических заданиях.

3 Наполнение и функциональность цифровой модели зависит от стадии жизненного цикла 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 ПО КМ 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.

Цифровая сертификация

Специализированный бизнес-процесс, основанный на тысячах / десятках тысяч цифровых (виртуальных) испытаний как отдельных компонентов, так и системы в целом, целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натурных, квалификационных, сертификационных и прочих испытаний [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 7 ноября 2023 г. № 3113-р ; [336]].

Цифровой двойник (DT)

- **Цифровой двойник изделия:** Система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при

наличии изделия) и (или) его составными частями [ГОСТ Р 57700.37–2021].

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.

Для разработки цифрового двойника изделия создается многоуровневая система требований, которая позволяет проверять соответствие значений показателей, необходимых для удовлетворения требований к изделию, установленным диапазонам значений, а также анализировать их взаимное влияние. Достижение целевых показателей и (или) удовлетворение ресурсным ограничениям многоуровневой системы требований обеспечивается за счет проведения цифровых (виртуальных) испытаний изделия, его **составных** частей и материалов [ГОСТ Р 57700.37–2021].

Для создания цифровых моделей и (или) цифровых двойников, 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 [ГОСТ Р 57700.37–2021].

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 [336].

Программно-технологические платформы цифровых двойников изделий (DT for Product): Системы, используемые при создании и применении цифрового двойника изделия участниками процессов жизненного цикла по ГОСТ Р 56135 [2].

Программно-технологические платформы цифровых двойников производства и инфраструктурных объектов (DT for Infrastructure) – системы, обеспечивающие создание цифрового двойника производства и/или инфраструктурных объектов, реализующие сервисы управления в режиме реального времени, аналитики в автономном режиме, предиктивного обслуживания, проверки работоспособности [2].

Программы для создания цифровых двойников производственного оборудования и систем, инфраструктурных объектов и готовых изделий: Программное обеспечение, предназначенное для создания компьютерных моделей, позволяющих воспроизводить форму и действия физических объектов [1].

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 [ДК развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»].

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 [ГОСТ Р 57700.37–2021].

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

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 [ГОСТ Р 57700.37–2021].

Цифровые (виртуальные) испытания

- Определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта [ГОСТ Р 57700.37–2021].

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.

Численное моделирование

- Моделирование поведения объекта, процесса, явления путем получения численного решения уравнений математической модели [ГОСТ Р 57188–2016].

Моделирование поведения динамических рабочих процессов в заданных условиях путем получения численного решения уравнений математической модели с целью решения задачи оптимизации по заданным критериям существующего или планируемого процессного управления социотехнической системы [ГОСТ Р 57700.3–2017].

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Классификатор ПО [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-ikt.ru/reestrpo> (дата обращения: 26.11.2025).
2. Приказ Росстата от 21.10.2024 N 483 — Редакция от 21.10.2024 — Контур.Норматив [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=480912> (дата обращения: 26.11.2025).
3. Composite Materials under Extreme Radiation and Temperature Environments of the Next Generation Nuclear Reactors | IntechOpen [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/16724> (дата обращения: 24.11.2025).
4. Development of Polymer Composites in Radiation Shielding Applications: A Review | Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10904-023-02725-6> (дата обращения: 24.11.2025).
5. Zhmurikov, E. Electronic structure and physical properties of ¹³C carbon composite [Электронный ресурс]. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1510.07214v1> (дата обращения: 19.10.2025).
6. Kalita, P.; Ghosh, S.; Gutierrez, G.; Rajput, P.; Grover, V.; Sattonnay, G.; Avasthi, D.K. Radiation tolerance: Nano triumphs bulk [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1912.11359> (дата обращения: 20.10.2025).
7. Prokhorenko, E.M.; Lytvynenko, V.V.; Zakharchenko, A.A.; Khazhmuradov, M.A.; Sokolov, S.A.; Prokhorenko, T.G.; Ben, A.P. Analysis of radiation protective properties of polystyrene-based composite materials [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/352863173_ANALYSIS_OF_RADIATION_PROTECTIVE_PROPERTIES_OF_POLYSTYRENE-BASED_COMPOSITE_MATERIALS (дата обращения: 19.10.2025).
8. Sauder, C. Ceramic matrix composites: nuclear applications [Электронный ресурс] // Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology. 2015. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118832998> (дата обращения: 19.10.2025).
9. Polymer-Composite Materials for Radiation Protection | ACS Applied Materials & Interfaces [Электронный ресурс]. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/am300783d> (дата обращения: 24.11.2025).
10. Castin, N.; Bonny, G.; Konstantinović, M.J.; Bakaev, A.; Bergner, F.; Courilleau, C.; Domain, C.; Gómez-Ferrer, B.; Hyde, J.M.; Messina, L.; Monnet, G.; Pascuet, M.I.; Radiguet, B.; Serrano, M.; Malerba, L. Multiscale modelling in nuclear ferritic steels: From nano-sized defects to embrittlement [Электронный ресурс] // Materials Today Physics. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542529322002000> (дата обращения: 19.10.2025).

11. Panfilov A. B. D. Barabash, V. Pertsev, and D. Polymer-composite materials for radiation protection [Электронный ресурс] // Radiation Protection and Shielding. 2018. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/am300783d> (дата обращения: 18.10.2025).
12. Romanenko, I. New Composite Material Based on Heavy Concrete and Basalt-Boron Fiber for Neutron Radiation Shielding Properties [Электронный ресурс] // Nuclear Research and Safety. 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2491929219000104> (дата обращения: 20.10.2025).
13. Dissertori, G и др. Performance studies of scintillating ceramic samples exposed to ionizing radiation [Электронный ресурс]. 2012. URL: <https://arxiv.org/abs/1211.3940> (дата обращения: 19.10.2025).
14. Sibilieva, T., Alekseev, V., Barsuk, S. et al. 3D printing of inorganic scintillator-based particle detectors [Электронный ресурс] // Journal of Instrumentation. 2023. URL: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/03/P03007> (дата обращения: 20.10.2025).
15. NACE Rev. 2.1 – Statistical classification of economic activities in the European Union – 2025 edition [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/w/ks-gq-24-007> (дата обращения: 24.10.2025).
16. World Energy Investment 2025 – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2025/executive-summary> (дата обращения: 23.10.2025).
17. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 [Электронный ресурс]: text // IAEA. IAEA, 2025. URL: <http://www.iaea.org/publications/15942/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050> (дата обращения: 24.10.2025).
18. Reactor Database Global Dashboard [Электронный ресурс] // World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary> (дата обращения: 23.10.2025).
19. World Nuclear Industry Status Report [Электронный ресурс]. URL: <https://www.worldnuclearreport.org/> (дата обращения: 24.10.2025).
20. The Database on Nuclear Power Reactors [Электронный ресурс] // The Power Reactor Information System | IAEA. URL: <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx> (дата обращения: 24.10.2025).
21. The Annual Reports [Электронный ресурс] // World Nuclear Industry Status Report. 2025. URL: <https://www.worldnuclearreport.org/The-Annual-Reports> (дата обращения: 14.10.2025).
22. IEAC – International Energy Advisory Council [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ieac.info/> (дата обращения: 14.10.2025).
23. INRAG – International Nuclear Risk Assessment Group [Электронный ресурс]. URL: <https://www.inrag.org/> (дата обращения: 14.10.2025).

24. World Nuclear Industry Status Report 2025 [Электронный ресурс] // World Nuclear Industry Status Report. 2025. URL: <https://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2025> (дата обращения: 24.10.2025).
25. Итоги деятельности 2024. Электроэнергетический дивизион [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://report.rosatom.ru/go/2024/rea_2024.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
26. Nuclear Generation by Country [Электронный ресурс] // World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/Information-Library/Facts-and-Figures/nuclear-generation-by-country> (дата обращения: 23.10.2025).
27. CIMdata [Электронный ресурс] // CIMdata. 2025. URL: <https://www.cimdata.com/en/> (дата обращения: 27.10.2025).
28. CIMdata Publishes Executive PLM Market Report [Электронный ресурс] // CIMdata. 2025. URL: <https://www.cimdata.com/en/news/item/28169-cimdata-publishes-executive-plm-market-report> (дата обращения: 27.10.2025).
29. Simulation & Analysis Market Analysis Report [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://images.g2crowd.com/uploads/attachment/file/175875/CIMdata-2021-Simulation_-_Analysis-Market-Analysis-Report.pdf (дата обращения: 25.11.2025).
30. Computer-aided Engineering Market Trends 2025 to 2035 [Электронный ресурс] // Future Market Insights. 2025. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/computer-aided-engineering-market> (дата обращения: 24.10.2025).
31. CIMdata Publishes PLM Market and Solution Provider Market Report [Электронный ресурс] // CIMdata. 2025. URL: <https://www.cimdata.com/en/news/item/28569-cimdata-publishes-plm-market-and-solution-provider-market-report> (дата обращения: 27.10.2025).
32. CIMdata Publishes PLM Market and Solution Provider Market Report [Электронный ресурс] // CIMdata. URL: <https://www.cimdata.com/en/news/item/28569-cimdata-publishes-plm-market-and-solution-provider-market-report> (дата обращения: 27.10.2025).
33. Connecting Simulation to Enterprise Digital Thread Driven by Collaborative Engineering Platforms and SPDM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pseven.io/assets/files/publications/P7UC2024/P7UC2024-CIMdata-Keynote-Natu.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
34. Rayxpert modélisation 3D et calcul de dose par la méthode Monte Carlo - RayXpert [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rayxpert.com/> (дата обращения: 24.10.2025).
35. DEMplus - Cyclife Digital Solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cyclife-ds.com/produits/demplus/> (дата обращения: 24.10.2025).
36. DAGMC: Direct Accelerated Geometry Monte Carlo — DAGMC [Электронный ресурс]. URL: <https://svalinn.github.io/DAGMC/> (дата обращения: 24.10.2025).
37. FDS Team-Hefei Institutes of Physical Science, The Chinese Academy of Sciences

- [Электронный ресурс]. URL: <https://english.hf.cas.cn/r/rp/FDSTeam/> (дата обращения: 24.10.2025).
38. Отчет по рынку композитных материалов: размер, рост, доля и тенденции до 2030 года [Электронный ресурс] // Mordor Intelligence. 2025. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/composite-material-market> (дата обращения: 18.12.2025).
39. Materials modelling and digitalisation [Электронный ресурс] // Materials Modelling. 2025. URL: <https://materialsmodelling.com/> (дата обращения: 26.11.2025).
40. Тренды и перспективы развития цифрового проектирования и моделирования (включая цифровые технологии моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов). Экспертно-аналитический доклад: монография / А. И. Боровков [и др.]; под ред. канд. техн. наук А. И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 140 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://technet.spbstu.ru/article/trendy-i-perspektivy-razvitiya-cifrovogo-proektirovaniya-i-modelirovaniya> (дата обращения: 16.10.2025).
41. Goldbeck G., Simperler A., Roscioni O. Materials Modelling and Informatics Software Market [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://zenodo.org/records/8101869> (дата обращения: 28.10.2025).
42. Goldbeck G., Simperler A. Materials Modelling Software Market [Электронный ресурс]. 2020. URL: <https://zenodo.org/records/4016090> (дата обращения: 28.10.2025).
43. Composite Simulation Software Market Size, Growth, Trends & Research & Forecast 2033 [Электронный ресурс] // Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/composite-simulation-software-market/> (дата обращения: 28.10.2025).
44. Composite Simulation Software Market Size, Share & Trends Analysis 2033 [Электронный ресурс] // Market Research Intellect. 2025. URL: <https://www.marketresearchintellect.com/product/global-composite-simulation-software-market-size-and-forecast/> (дата обращения: 28.10.2025).
45. Composite Simulation Software Market Report | Global Forecast From 2025 To 2033 [Электронный ресурс] // Dataintel Consulting. URL: <https://dataintel.com/report/composite-simulation-software-market> (дата обращения: 30.10.2025).
46. Composite Simulation Software Market Size, Share, Growth | CAGR Forecast 2032 [Электронный ресурс] // Future Market Report. URL: <https://www.futuremarketreport.com/industry-report/composite-simulation-software-market> (дата обращения: 30.10.2025).
47. Composite Material Simulation Analysis Software Market Disruption and Future Trends [Электронный ресурс] // Market Report Analytics. 2025. URL: <https://www.marketreportanalytics.com/reports/composite-material-simulation-analysis-software-56595> (дата обращения: 30.10.2025).

48. NX Fibersim [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/products/fibersim-composites/> (дата обращения: 16.10.2025).
49. Simcenter Culgi [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/culgi/> (дата обращения: 16.10.2025).
50. Simcenter 3D [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/mechanical-simulation/simcenter-3d/> (дата обращения: 16.10.2025).
51. Composite Materials Performance Evaluation – using a fast, virtual testing tool [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. 2021. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/composite-materials-performance-evaluation-using-a-fast-virtual-testing-tool/> (дата обращения: 16.10.2025).
52. Simcenter 3D for composites simulation: Solution guide, 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ata-e.com/wp-content/uploads/2024/10/Siemens_Simcenter_3D_Composites_Simulation_Solution_Guide_SET.pdf (дата обращения: 16.10.2025).
53. What's new in NX | Composites and NX Join [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. 2023. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/whats-new-in-nx-composites-nx-join/> (дата обращения: 16.10.2025).
54. NX Composites: Part One | Tips and Tricks [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. 2023. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/composites-part-one-tips-and-tricks/> (дата обращения: 16.10.2025).
55. Designcenter [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/designcenter/> (дата обращения: 16.10.2025).
56. Innovate and accelerate with product design software [Электронный ресурс] // Siemens Digital Industries Software. URL: <https://www.sw.siemens.com/en-US/solutions/product-design/> (дата обращения: 16.10.2025).
57. Siemens acquires Altair to create most complete AI-powered portfolio [Электронный ресурс]: c2_ct_press_release // Siemens AG. URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-acquires-altair-create-most-complete-ai-powered-portfolio-industrial-software> (дата обращения: 16.10.2025).
58. Altair HyperWorks. Design and Simulation Platform. [Электронный ресурс] // Altair. 2025. URL: <https://altair.com/altair-hyperworks> (дата обращения: 31.10.2025).
59. Altair ESAComp Datasheet [Электронный ресурс] // Altair. 2025. URL: <https://altair.com/resource/altair-esacomp-datasheet> (дата обращения: 30.10.2025).
60. Altair OptiStruct [Электронный ресурс] // Altair. 2025. URL: <https://altair.com/optistruct> (дата обращения: 29.10.2025).

61. Altair Multiscale Designer [Электронный ресурс] // Altair. 2025. URL: <https://altair.com/multiscale-designer> (дата обращения: 30.10.2025).
62. Altair RapidMiner [Электронный ресурс] // Altair. 2025. URL: <https://altair.com/altair-rapidminer> (дата обращения: 30.10.2025).
63. BIOVIA Materials Studio [Электронный ресурс] // Dassault Systèmes. 2025. URL: <https://www.3ds.com/products/biovia/materials-studio> (дата обращения: 31.10.2025).
64. SIMULIA Structural Simulation [Электронный ресурс] // Dassault Systèmes. 2025. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/structural-simulation> (дата обращения: 31.10.2025).
65. Digimat [Электронный ресурс] // Hexagon. 2025. URL: <https://hexagon.com/products/digimat> (дата обращения: 31.10.2025).
66. Hexagon MaterialCenter [Электронный ресурс] // Hexagon. 2025. URL: <https://hexagon.com/ru/products/materialcenter> (дата обращения: 30.10.2025).
67. OpenEye Cadence Molecular Sciences. Improving lives through computational molecular design. [Электронный ресурс] // Cadence. 2025. URL: <https://www.eyesopen.com/> (дата обращения: 31.10.2025).
68. COMSOL Multiphysics Simulation Software [Электронный ресурс] // COMSOL. 2025. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата обращения: 31.10.2025).
69. Composite Materials Module [Электронный ресурс] // COMSOL. 2025. URL: <https://www.comsol.com/composite-materials-module> (дата обращения: 30.10.2025).
70. Autodesk Inventor Nastran [Электронный ресурс] // Autodesk. 2025. URL: <https://www.autodesk.com/tw/products/simulation-mechanical> (дата обращения: 30.10.2025).
71. PTC. Get Started with Creo Parametric [Электронный ресурс] // PTC. 2025. URL: <https://www.ptc.com/en/success-paths/get-started-creo-parametric/plan/get-familiar-with-creo-parametric> (дата обращения: 30.10.2025).
72. QuantumATK [Электронный ресурс] // Synopsys. 2025. URL: <https://www.synopsys.com/manufacturing/quantumatk.html> (дата обращения: 30.10.2025).
73. Simpleware [Электронный ресурс] // Synopsys. 2025. URL: <https://www.synopsys.com/simpleware.html> (дата обращения: 30.10.2025).
74. Synopsys Completes Acquisition of Ansys [Электронный ресурс] // Synopsys. URL: <https://investor.synopsys.com/news/news-details/2025/Synopsys-Completes-Acquisition-of-Ansys/default.aspx> (дата обращения: 16.10.2025).
75. Ansys Composite PrepPost (ACP) for developers [Электронный ресурс] // Ansys. 2025. URL: <https://developer.ansys.com/docs/acp> (дата обращения: 30.10.2025).
76. Ansys Granta MI [Электронный ресурс] // Ansys. 2025. URL: <https://www.ansys.com/products/materials/granta-mi> (дата обращения: 30.10.2025).

77. Ansys Multiphysics + Multiscale.Sim [Электронный ресурс] // ANSYS. 2025. URL: <https://www.ansys.com/partner-ecosystem/technology-partners/cybernet-multiscale-sim> (дата обращения: 30.10.2025).
78. PAM-COMPOSITES. Composite Simulation Software. [Электронный ресурс] // Keysight Technologies. 2025. URL: <https://www.esi-group.com/products/pam-composites> (дата обращения: 30.10.2025).
79. J-Composites [Электронный ресурс] // jsol. 2025. URL: <https://www.jsol-cae.com/en/products/j-composites/index.html> (дата обращения: 30.10.2025).
80. J-ОСТА [Электронный ресурс] // jsol. 2025. URL: <https://www.jsol-cae.com/en/products/j-octa/index.html> (дата обращения: 30.10.2025).
81. SiGA SiC Composite [Электронный ресурс] // General Atomics. URL: <https://www.ga.com/nuclear-fission/siga-sic-composite> (дата обращения: 23.10.2025).
82. Advanced Nuclear Fuel Cladding: Innovative Materials Enhance Fleet Safety and Performance [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ans.org/news/2025-02-25/article-6777/advanced-nuclear-fuel-cladding-innovative-materials-enhance-fleet-safety-and-performance/> (дата обращения: 23.10.2025).
83. General Atomics, Framatome join for fuel channel work [Электронный ресурс] // World Nuclear News. 2020. URL: <https://world-nuclear-news.org/articles/ga-framatome-team-up-on-fuel-channel-development> (дата обращения: 23.10.2025).
84. The Use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) in US Nuclear Power Plants [Электронный ресурс] // Civil and Environmental Engineering and Earth Sciences. URL: <https://ceees.nd.edu/events/the-use-of-carbon-fiber-reinforced-polymer-cfrp-in-us-nuclear-power-plants/> (дата обращения: 23.10.2025).
85. Additive Composite и Add North 3D представляют материал для 3D-печати с защитой от радиации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/rashodnye-materialy/additive-composite-i-add-north-3d-predstavlyayut-material-dlya-3d-pechati-s-zaschitoy-ot-radiatsii/> (дата обращения: 23.10.2025).
86. V C. A filament based on boron carbide, one of the hardest materials on the market [Электронный ресурс] // 3Dnatives. 2020. URL: <https://www.3dnatives.com/en/filament-based-on-boron-carbide-060220205/> (дата обращения: 23.10.2025).
87. Nuclear Waste Encapsulation with Geopolymer Technology [Электронный ресурс] // Lucideon. URL: <https://www.lucideon.com/technologies/mallet> (дата обращения: 23.10.2025).
88. Tracey. Scaling up on geopolymers for safe nuclear waste disposal [Электронный ресурс] // Nuclear Engineering International. 2024. URL: <https://www.neimagazine.com/analysis/scaling-up-on-geopolymers-for-safe-nuclear-waste-disposal/> (дата обращения: 23.10.2025).
89. Private enterprise in Dalian Jinpu New District overcomes world-class problems [Электронный ресурс]. URL: http://www.gaxq.gov.cn/xwdt/xqlw/201812/t20181217_1985372.html (дата обращения: 23.10.2025).

90. 2024 Nuclear Materials Conference (NuMat 2024) (organized in cooperation with the International Atomic Energy Agency) [Электронный ресурс]: text. IAEA, 2024. URL: <http://www.iaea.org/events/evt2305889> (дата обращения: 18.12.2025).
91. FISA-EURADWASTE 2025 & SNETP Forum [Электронный ресурс]. URL: https://snetp.eu/wp-content/uploads/2025/07/SNETP-Forum-2025-Takeways_20250715_VF-ISBN.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
92. Materials in Nuclear Energy Systems (MiNES) 2025: Home [Электронный ресурс]. URL: https://www.tms.org/portal/portal/Meetings___Events/2025/MiNES2025/default.aspx (дата обращения: 18.12.2025).
93. Seventh International Workshop on Structural Materials for Innovativ... [Электронный ресурс] // EERA. 2024. URL: <https://www.eera-set.eu/events/4408:seventh-international-workshop-on-structural-materials-for-innovative-nuclear-systems-smins-7.html> (дата обращения: 18.12.2025).
94. ICAPP 2025 [Электронный ресурс] // Sfen. URL: <https://www.sfen.org/evenement/icapp-2025/> (дата обращения: 18.12.2025).
95. NAFEMS - SMIRT 28 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nafems.org/events/industry-events/smirt-28/> (дата обращения: 18.12.2025).
96. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». [Электронный ресурс] // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 21.11.2025).
97. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения (с Изменением N 1) – docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005367?marker=7D20K3> (дата обращения: 18.12.2025).
98. General Atomics Creating «Nuclear Fuel Digital Twin» to Accelerate Silicon Carbide Cladding Technology Testing, Qualification [Электронный ресурс] // General Atomics. URL: <https://www.ga.com/ga-creating-nuclear-fuel-digital-twin-to-accelerate-silicon-carbide-cladding-technology-testing-qualification> (дата обращения: 30.10.2025).
99. General Atomics accelerates nuclear fuel digital twin testing, qualification [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.compositesworld.com/news/general-atomics-to-create-accelerates-nuclear-fuel-digital-twin-testing-qualification> (дата обращения: 30.10.2025).
100. Farda A. и др. French Digital Nuclear Reactor Initiative: A Common Platform for Advanced Code Coupling for the French Nuclear Industry [Электронный ресурс]: IAEA-CN--308 // International Conference on Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Strengthening Safety of Evolutionary and Innovative Reactor Designs. Book of Abstracts. 2022. URL: <https://inis.iaea.org/records/3e23d-sjp29> (дата обращения: 30.10.2025).
101. Project launched to digitally clone all French reactors [Электронный ресурс] // World Nuclear

- News. 2020. URL: <https://world-nuclear-news.org/articles/project-launched-to-digitally-clone-all-french-rea> (дата обращения: 30.10.2025).
102. Welcome to EFICAS's documentation! — EFICAS documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/EFICAS/index.html> (дата обращения: 01.11.2025).
 103. Collaborative Code Coupling PlatfOrm [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://github.com/code-coupling/c3po> (дата обращения: 01.11.2025).
 104. Solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metroscope.tech/solutions> (дата обращения: 30.10.2025).
 105. Corporativa I. Digital twins, the keys to the Fourth Industrial Revolution [Электронный ресурс] // Iberdrola. URL: <https://www.iberdrola.com/about-us/our-innovation-model/digital-twin> (дата обращения: 30.10.2025).
 106. DOE Announces \$27 Million for Advanced Nuclear Reactor Systems Operational Technology [Электронный ресурс] // Energy.gov. 2020. URL: <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-27-million-advanced-nuclear-reactor-systems-operational-technology> (дата обращения: 30.10.2025).
 107. Going digital: Idaho students, engineers demonstrate first nuclear reactor digital twin – Idaho National Laboratory [Электронный ресурс]. URL: <https://inl.gov/news/going-digital-idaho-students-engineers-demonstrate-first-nuclear-reactor-digital-twin/> (дата обращения: 30.10.2025).
 108. Skyris LLC [Электронный ресурс]: EURAD. 2025. URL: <http://skyris.pro/about> (дата обращения: 27.06.2025).
 109. Next generation Digital Twins to support Optimisation, Construction and Operation of surface and subsurface radioactive waste management facilities (DITOC02030) | Eurad [Электронный ресурс] // EURAD. 2025. URL: <https://www.ejp-eurad.eu/implementation/next-generation-digital-twins-support-optimisation-construction-and-operation> (дата обращения: 03.12.2025).
 110. Goff M. First-of-a-kind technology: INL demonstrates mobile hot cell for radioactive source recovery [Электронный ресурс] // Idaho National Laboratory. 2023. URL: <https://inl.gov/feature-story/first-of-a-kind-technology-inl-demonstrates-mobile-hot-cell-for-radioactive-source-recovery/> (дата обращения: 04.12.2025).
 111. Khadka R. и др. Mobile Hot Cell Digital Twin: End-of-life Management of Disused High Activity Radioactive Sources – 23598 [Электронный ресурс]. 2023. № INL/CON-21-64873-Rev000. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1838415> (дата обращения: 04.12.2025).
 112. Houck K. и др. Beartooth: Nuclear material testbed with MBSE and digital twin // INCOSE Int. Symp. John Wiley & Sons, Ltd, 2022. Т. 32. С. 142–154.
 113. Digital Engineering of a Nuclear Fuel Processing Testbed [Электронный ресурс] // Idaho National Laboratory. URL: <https://dice.inl.gov/case-study/digital-engineering-of-a-nuclear-fuel->

- processing-testbed/ (дата обращения: 04.12.2025).
114. CX-033060: Special Nuclear Material Test Bed (Beartooth) Rev. 1 [Электронный ресурс] // United States Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/непа/articles/cx-033060-special-nuclear-material-test-bed-beartooth-rev-1> (дата обращения: 04.12.2025).
 115. Real Digital Twin supports safer decommissioning of nuclear power [Электронный ресурс] // AFRY. 2025. URL: <https://afry.com/en/project/afry-x-real-digital-twin-supports-safer-decommissioning-nuclear-power> (дата обращения: 04.12.2025).
 116. AFRY Real Digital Twin Framework [Электронный ресурс] // AFRY. 2025. URL: <https://afry.com/en/service/afry-real-digital-twin-framework> (дата обращения: 04.12.2025).
 117. Bird O. Cloud computer and AI in digital twins [Электронный ресурс] // Haskoning. 2025. URL: <https://www.haskoning.com/en/twinn/impact-stories/washington-river-protection-solution> (дата обращения: 04.12.2025).
 118. Naarea [Электронный ресурс] // Naarea. URL: <https://www.naarea.fr/en/naarea-and-its-team-deliver-their-commitment-finalizing-its-xamrr-digital-twin> (дата обращения: 19.11.2025).
 119. Advanced Operation & Maintenance Techniques Implemented in the Xe-100 Plant Digital Twin to Reduce Fixed O&M Cost | ARPA-E [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/advanced-operation-maintenance-techniques-implemented-xe-100-plant-digital-twin-reduce-fixed-om-cost> (дата обращения: 19.11.2025).
 120. New regional centre to support Xe-100 fleet rollout [Электронный ресурс] // World Nuclear News. 2023. URL: <https://world-nuclear-news.org/articles/new-regional-centre-to-support-xe-100-fleet-rollou> (дата обращения: 19.11.2025).
 121. AI-Enabled Predictive Maintenance Digital Twins for Advanced Nuclear Reactors | ARPA-E [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/ai-enabled-predictive-maintenance-digital-twins-advanced-nuclear-reactors> (дата обращения: 19.11.2025).
 122. Swagath B. V. US Department of Energy awards two advanced reactor projects utilising the BWRX-300 small modular reactor design [Электронный ресурс] // NS Energy. 2020. URL: <https://www.nsenergybusiness.com/news/contracts/us-department-of-energy-awards-two-advanced-reactor-projects-utilising-the-bwrx-300-small-modular-reactor-design/> (дата обращения: 19.11.2025).
 123. Advancing microreactor technology efficiencies through digital twins [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://pitapa.org/news/2024/09/18-advancing-microreactor-technology.html> (дата обращения: 19.11.2025).
 124. Powering the Future With PLM [Электронный ресурс] // Aras. 2025. URL: <https://aras.com/en/resources/all/cs-nuscale-powering-future-plm> (дата обращения: 19.11.2025).

125. The Digital Nuclear Reactor Initiative: First steps towards advanced applications | EPJ Web of Conferences [Электронный ресурс]. URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2024/12/epjconf_snamc2024_05009/epjconf_snamc2024_05009.html (дата обращения: 18.12.2025).
126. ICONE 32: The 32nd International Conference on Nuclear Engineering, Weihai, China, June 2025 [Электронный ресурс]. URL: <https://event.asme.org/ICONE> (дата обращения: 18.12.2025).
127. Итоги деятельности 2020 [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://report.rosatom.ru/go/2020/rosatom_2020.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
128. Итоги деятельности 2021 [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2021/rosatom_2021_ru.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
129. Итоги деятельности 2022 [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2022/rosatom_2022_ru.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
130. Итоги деятельности 2023 [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2023/rosatom_2023_ru.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
131. Ключевые результаты деятельности 2024 [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: https://www.report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2024/rosatom_2024_key_results_ru.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
132. О «Росатоме» [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». URL: <https://rosatom.ru/about/> (дата обращения: 30.10.2025).
133. Зайцев А.А. и др. Энергетическое машиностроение и атомная промышленность России в условиях санкций—возможности переориентации импортных поставщиков и перспективы сотрудничества с Китаем: отраслевое исследование. – Центр комплексных европейских и международных исследований НИУ ВШЭ. – 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://cceis.hse.ru/news/712281277.html> (дата обращения: 31.10.2025).
134. Лихачев: доля «Росатома» на мировом рынке превышает 90% [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. 2025. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7855052> (дата обращения: 30.10.2025).
135. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.06.2014 № 506-12 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» [Электронный ресурс]. URL:

- <http://government.ru/docs/all/91671/> (дата обращения: 20.11.2025).
136. Указ Президента РФ от 16.04.2020 N 270 «О развитии техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_350525/ (дата обращения: 01.11.2025).
 137. Указ Президента РФ от 14.04.2022 № 202 «О продлении срока действия комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» [Электронный ресурс] // Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/all/140463/> (дата обращения: 01.11.2025).
 138. Комплексная программа «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс] // Госкорпорация «Росатом». URL: <https://rkm.rosatom.ru/innov/projects/kprttt/> (дата обращения: 01.11.2025).
 139. Национальный проект «Новые атомные и энергетические технологии» [Электронный ресурс] // Правительство России. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/929/events/> (дата обращения: 01.11.2025).
 140. Национальный проект «Новые атомные и энергетические технологии» [Электронный ресурс] // Частное учреждение по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации». URL: <https://naukarosatom.ru/projects/> (дата обращения: 01.11.2025).
 141. Распоряжение Правительства РФ от 4 июля 2023 года №1789-р «Об утверждении комплексной научно-технической программы «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства» [Электронный ресурс] // Правительство России. 2025. URL: <http://government.ru/docs/49027/> (дата обращения: 01.11.2025).
 142. Strategy Partners — ведущая российская консалтинговая компания [Электронный ресурс] // Strategy Partners. URL: <https://strategy.ru/> (дата обращения: 31.10.2025).
 143. ИИ, блокчейн и устойчивые практики: как развивается российский рынок инженерного ПО - Исследования - 22.10.2024 [Электронный ресурс] // Strategy Partners. URL: <https://strategy.ru/research/research/ii-blokcheyn-i-ustoychivye-praktiki-kak-razvivaetsya-rossiyskiy-rynok-inzhenernogo-po-85/> (дата обращения: 31.10.2025).
 144. Рынок программного обеспечения и ИТ-услуг [Электронный ресурс] // Группа компаний Б1. URL: <https://b1.ru/analytics/b1-software-and-it-services-in-russia-research-2025/> (дата обращения: 31.10.2025).
 145. О группе компаний Б1 [Электронный ресурс] // Группа компаний Б1. URL: <https://b1.ru/about-us/> (дата обращения: 31.10.2025).
 146. Композитный мир №2 (111) — 2025 [Электронный ресурс]. URL: <https://cp-vm.ru/wp-content/uploads/2-111-2025-web.pdf?ysclid=mjcuqbvfq7376860195> (дата обращения:

- 19.12.2025).
147. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench® [Электронный ресурс]. URL: <https://cml-bench.ru> (дата обращения: 17.11.2025).
 148. Логос [Электронный ресурс] // Логос. Росатом. 2025. URL: <https://logos-support.ru/about/> (дата обращения: 29.10.2025).
 149. САРУС+ | Композиты [Электронный ресурс]. URL: <http://sarusplus.ru/composites> (дата обращения: 18.11.2025).
 150. Цифровая платформа ТММК — Технологии, материалы и конструкции. Система для принятия технических решений в области разработки и производства продукции [Электронный ресурс] // Оператор ТММК. Росатом. 2025. URL: <https://xn--h1aeex.xn--p1ai/> (дата обращения: 29.10.2025).
 151. Анализ прочности конструкций из композиционных материалов. [Электронный ресурс] // АПМ. 2025. URL: <https://apm.ru/analysis-of-strength-of-structures-made-of-composites> (дата обращения: 29.10.2025).
 152. FlowVision. Российский CAE-пакет для междисциплинарного моделирования устройств и физических процессов. [Электронный ресурс] // FlowVision. 2025. URL: <https://flowvision.ru/ru/> (дата обращения: 29.10.2025).
 153. Ю.И. Димитриенко. Вклад МГТУ им.Н.Э.Баумана в разработку отечественного инженерного и образовательного ПО [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/121241/Dmitrienko.pdf> (дата обращения: 29.10.2025).
 154. CAE Fidesys Composite [Электронный ресурс] // Fidesys. 2025. URL: <https://cae-fidesys.com/cae-fidesys-composite> (дата обращения: 30.10.2025).
 155. Отрасли применения: атомная промышленность [Электронный ресурс] // Росатом. Композитные технологии. URL: <https://rosatom-composites.ru/applications/nuclear/> (дата обращения: 13.11.2025).
 156. До 2045 года в России будет внедрено использование оболочек твэлов из карбида кремния | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/08/29/158924> (дата обращения: 24.10.2025).
 157. Во ВНИИНМ впервые в России получили оболочки твэлов из карбида кремния [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2022/01/17/vo-vniinm-vpervye-v-rossii-poluchili-ob/> (дата обращения: 24.10.2025).
 158. Новый композитный материал SiC-SiC увеличит КПД атомных реакторов в полтора раза - FEA.RU | CompMechLab - разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/НПС [Электронный ресурс]. URL: <https://fea.ru/news/3068> (дата обращения: 24.10.2025).
 159. В «Росатоме» создается дивизион «Композитные материалы» [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2016/04/12/v-rosatome-sozdaetsya-divizion-kom/> (дата

- обращения: 24.10.2025).
160. Композитное вращение: как углеволокно делает центрифуги прочнее [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2023/02/28/kompozitnoe-vrashhenie-kak-uglevolokn/> (дата обращения: 24.10.2025).
 161. Новости [Электронный ресурс]. URL: https://www.tvel.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=21812&arrNewsFilter_idBlock=1 (дата обращения: 24.10.2025).
 162. Подобран оптимальный метод производства легких композитов для атомной отрасли [Электронный ресурс] // ТАСС. 2025. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/25039857> (дата обращения: 24.10.2025).
 163. Все дело в порох: разработан композитный материал для термоядерного реактора [Электронный ресурс]. URL: <https://strana-rosatom.ru/2025/02/27/vse-delo-v-porah-razrabotan-kompozitn/> (дата обращения: 24.10.2025).
 164. Созданы композиты для ядерных реакторов нового поколения | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2018/06/21/86830> (дата обращения: 24.10.2025).
 165. В России создали технологию производства композита из непрерывного углеволокна для 3D-печати [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://engineers2030.ru/press/news/6608/> (дата обращения: 18.11.2025).
 166. Передовые цифровые и производственные технологии выпуск №9 [Электронный ресурс]. URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2025/11/Digest/2025_Digest_PISH_SPbPU_01-06_No9_Page.pdf (дата обращения: 18.12.2025).
 167. Конференция «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2025) задает стратегические ориентиры для атомной отрасли России [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://www.tvel.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=21812&arrNewsFilter_idBlock=1 (дата обращения: 24.10.2025).
 168. Итоги форума «АТОМЭКСПО-2022» [Электронный ресурс]. URL: <https://2024.atomexpo.ru> (дата обращения: 19.12.2025).
 169. 17-я выставка Композит-Экспо 2025: отчет по итогам проведения, пресс-релиз, фотографии, видео, статистика, отзывы, интервью [Электронный ресурс]. URL: <https://www.composite-expo.ru/about/exhibition-archive/composite-expo-2025.html> (дата обращения: 19.12.2025).
 170. World Atomic Week [Электронный ресурс] // IndustriCS (industrics.ru). 2024. URL: <https://industrics.ru/> (дата обращения: 27.11.2024).
 171. Фестиваль «Композиты без границ» [Электронный ресурс]. URL: <https://compositesforum.ru/?ysclid=mj8p6k4ra4743210465> (дата обращения: 19.12.2025).
 172. Научно-практическая конференция «Ядерные технологии: от исследований к внедрению –

- 2025» проходит в НГТУ | НГТУ им. Р.Е. Алексеева [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nntu.ru/news/detail/nauka-i-innovacii/vse-novosti/nauchno-prakticheskaya-konferenciya-yadernye-tehnologii14475> (дата обращения: 19.12.2025).
173. Российская научно-техническая конференция «Материалы и технологии энергетических установок» (ЛУЧ-МТ-2025) — АО "НИИ НПО «ЛУЧ» [Электронный ресурс]. URL: <https://sialuch.com/mtpp-2025/> (дата обращения: 19.12.2025).
 174. Научно-практическая конференция «Применение термопластичных композиционных материалов в промышленности» ПИШ СПбПУ [Электронный ресурс]. URL: <https://leader-id.ru/en/events/506872> (дата обращения: 19.12.2025).
 175. Центр НТИ СПбПУ разработает «цифровой двойник» процесса изготовления ядерного топлива для Топливной компании «ТВЭЛ» [Электронный ресурс] // Официальный сайт Центра компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Новые производственные технологии» на базе Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. URL: <http://nticenter.spbstu.ru/news/7935> (дата обращения: 13.11.2025).
 176. Виртуальный аэродинамический полигон для тестирования беспилотных летательных аппаратов (2018-2019 гг.) [Электронный ресурс] // Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ. URL: <https://fea.ru/project/221> (дата обращения: 04.08.2025).
 177. Разработка цифрового двойника начальной стадии ядерного цикла в части ТВС-К PWR и ТВС ВВЭР [Электронный ресурс] // Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ. URL: <https://fea.ru/project/237> (дата обращения: 13.11.2025).
 178. В Передовой инженерной школе СПбПУ завершили разработку цифрового двойника тепловыделяющих сборок ядерных реакторов [Электронный ресурс] // Официальный сайт Центра компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Новые производственные технологии» на базе Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. URL: <http://nticenter.spbstu.ru/news/9085> (дата обращения: 13.11.2025).
 179. Цифровой двойник тепловыделяющей сборки ядерного реактора [Электронный ресурс] // Официальный сайт Центра компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Новые производственные технологии» на базе Института передовых производственных технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/92 (дата обращения: 13.11.2025).
 180. Ученые «Росатома» завершили первый этап разработки цифрового двойника радиохимического производства [Электронный ресурс] // Частное учреждение по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации». URL: <https://naukarosatom.ru/news/uchenye-rosatoma-zavershili-pervyy-etap-razrabotki-tsifrovogo-dvoynika-radiokhimicheskogo-proizvodst/> (дата обращения: 13.11.2025).

181. Федоровский А. Ю., Кириенко С. О., Сиполс А. А. Цифровые двойники ядерных энергокомплексов [Электронный ресурс] // Атомная энергия. 2024. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5352> (дата обращения: 13.11.2025).
182. «Прорыв» Росатома при поддержке ИБРАЭ РАН внедрил в основу системы «УРАНИЯ» цифровую платформу CML-Bench от СПбПУ | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/07/08/147421> (дата обращения: 20.11.2025).
183. Цифровая платформа CML-Bench® легла в основу системы «УРАНИЯ», внедряемой на предприятиях госкорпорации «Росатом» [Электронный ресурс] // ncmu.spbstu.ru. URL: <https://ncmu.spbstu.ru/news/8878> (дата обращения: 20.11.2025).
184. Вышел очередной номер журнала «Передовые цифровые и производственные технологии» №9 / 2025 [Электронный ресурс] // pish.spbstu.ru. URL: <http://pish.spbstu.ru/news/9272> (дата обращения: 19.11.2025).
185. Представители предприятий, входящих в Госкорпорацию «Росатом», посетили Передовую инженерную школу СПбПУ «Цифровой инжиниринг» с целью ознакомления с её уникальными компетенциями и достижениями в атомной отрасли [Электронный ресурс] // nticenter.spbstu.ru. URL: <http://nticenter.spbstu.ru/news/8942> (дата обращения: 20.11.2025).
186. Представители ООО «Центротех-Инжиниринг» и магистранты ИППТ СПбПУ обсудили перспективные направления научно-исследовательских работ [Электронный ресурс]. URL: https://cte.tvet.ru/news/?ELEMENT_ID=11608 (дата обращения: 20.11.2025).
187. Инженеры Петербургского Политеха разработали архитектуру цифрового двойника печи остекловывания для утилизации высокоактивных радиоактивных отходов [Электронный ресурс] // pish.spbstu.ru. URL: <http://pish.spbstu.ru/news/8694> (дата обращения: 20.11.2025).
188. Передовая инженерная школа СПбПУ «Цифровой инжиниринг»: новые решения для производства топлива будущего | Научно-исследовательская деятельность Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://research.spbstu.ru/news/peredovaya_inzghenernaya_shkola_spbpu_cifrovoy_inzghiniring_novye_resheniya_dlya_proizvodstva_topliva_budushego/ (дата обращения: 18.11.2025).
189. Тюнин: автоматизация и цифровизация увеличивают спрос на композиты [Электронный ресурс] // Росатом. Композитные технологии. URL: <https://rosatom-composites.ru/news/tyunin-avtomatizatsiya-i-tsifrovizatsiya-velichivayut-spros-na-kompozity/> (дата обращения: 13.11.2025).
190. «Росатом» разрабатывает ядерное топливо с помощью цифрового двойника [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://strana-rosatom.ru/2024/06/16/rosatom-razrabatyvaet-yadernoe-top/> (дата обращения: 31.10.2025).
191. «Росатом» обсудил новые горизонты развития цифровой трансформации атомной энергетики [Электронный ресурс]. URL: https://rt.greenatom.ru/press-center/companys_news/?ELEMENT_ID=58012&ysclid=mjb69uczey80140644 (дата

обращения: 19.12.2025).

192. Атом Медиа | Пресс-релизы | «Росатом» представил на конференции «ЦИПР – 2025» проекты в сфере цифрового управления промышленными объектами [Электронный ресурс]. URL: <https://atommedia.online/press-releases/rosatom-predstavil-na-konferentsii-tsipr-2025-proekty-v-sfere-tsifrovogo-upravleniya-promyshlennymi-/?ysclid=mjb6c48ivz185217033> (дата обращения: 19.12.2025).
193. Будущее ядерной энергетики: цифровые двойники и ИИ | Институт энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [Электронный ресурс]. URL: https://ie.spbstu.ru/news/budushee_yadernoy_energetiki_cifrovy_e_dvoyniki_i_ii/?ysclid=mjb7invlrg149272902 (дата обращения: 19.12.2025).
194. Системный цифровой инжиниринг в атомном машиностроении [Электронный ресурс]. URL: <https://npt-forum.ru/sistemnyj-cifrovoj-inzhiniring-v-atomnom-mashinostroenii> (дата обращения: 19.12.2025).
195. Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной энергетике [Электронный ресурс]. URL: <https://npt-forum.ru/cifrovoj-inzhiniring-v-atomnoj-i-termoyadernoj-energetike> (дата обращения: 19.12.2025).
196. Атом Медиа | Пресс-релизы | На «АТОМЭКСПО-2024» обсудили границы возможностей применения цифровых двойников [Электронный ресурс]. URL: [https://atommedia.online/press-releases/na-atomekspo-2024-obsudili-granicy-voz/?ysclid=mjb7jbvssr65527473](https://atommedia.online/press-releases/na-atomekspo-2024-obsudili-granicy-vozmozhnostey-primeneniya-tsifrovyykh-dvoynikov) (дата обращения: 19.12.2025).
197. World Nuclear Performance Report 2025 - World Nuclear Association [Электронный ресурс]. URL: <https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/world-nuclear-performance-report> (дата обращения: 14.11.2025).
198. Kropaczek D. J., Vittorio B., Prashant K. L. Digital Twins for Nuclear Power Plants and Facilities [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-21343-4_31 (дата обращения: 28.11.2025).
199. Argonne creates new methodology for digital twins [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ans.org/news/2025-06-04/article-7089/argonne-creates-new-methodology-for-digital-twins/> (дата обращения: 14.11.2025).
200. Nuclear Technology Review 2024 [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.iaea.org/gc68/gc68inf4> (дата обращения: 14.11.2025).
201. The Virtual Environment for Reactor Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://vera.ornl.gov/> (дата обращения: 19.11.2025).
202. Schulenberg T., Leung L. K. H. SuperCritical Water-cooled Reactors (SCWRs) // Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. Elsevier, 2023. С. 259–284.
203. В Китае впервые в мире испытали аварийное отключение атомного реактора четвёртого поколения [Электронный ресурс] // 3DNews - Daily Digital Digest. URL: <https://3dnews.ru/1108542/v-kitae-pervimi-v-mire-ispitali-avariynoe-otklyuchenie->

- atomnogo-reaktora-chetvyortogo-pokoleniya (дата обращения: 10.11.2025).
204. Very High Temperature Reactor (VHTR) | GIF Portal [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/very-high-temperature-reactor-vhtr> (дата обращения: 14.11.2025).
 205. High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications [Электронный ресурс] // Nuclear Energy Agency (NEA). URL: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_70442/high-temperature-gas-cooled-reactors-and-industrial-heat-applications?details=true (дата обращения: 12.11.2025).
 206. Горячо забытое старое [Электронный ресурс]. URL: https://atomicexpert.com/hot_forgotten_old (дата обращения: 11.11.2025).
 207. Molten Salt Reactors (MSR) | GIF Portal [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/molten-salt-reactors-msr> (дата обращения: 12.11.2025).
 208. Chinese molten salt reactor achieves conversion of thorium-uranium fuel [Электронный ресурс] // World Nuclear News. 2025. URL: <https://world-nuclear-news.org/articles/chinese-msr-achieves-conversion-of-thorium-uranium-fuel> (дата обращения: 12.11.2025).
 209. Briefing T. C. Briefing: China's Thorium Molten Salt Reactor Program [Электронный ресурс]: Substack newsletter // The China Briefing. 2025. URL: <https://thechinabriefing.substack.com/p/briefing-chinas-thorium-molten-salt> (дата обращения: 12.11.2025).
 210. Kairos Power Begins Nuclear Safety-Related Construction of Hermes Low-Power Demonstration Reactor [Электронный ресурс] // Kairos Power. 2025. URL: https://kairospower.com/external_updates/kairos-power-begins-nuclear-construction-of-hermes-demonstration-reactor/ (дата обращения: 12.11.2025).
 211. Ohshima H., Kubo S. Sodium-cooled Fast Reactors (SFRs) [Электронный ресурс] // Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. 2023. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128205884000062> (дата обращения: 14.11.2025).
 212. Allen T. R., Crawford D. C. Lead-Cooled Fast Reactor Systems and the Fuels and Materials Challenges [Электронный ресурс] // Science and Technology of Nuclear Installations. 2007. URL: <http://www.hindawi.com/journals/stni/2007/097486/abs/> (дата обращения: 14.11.2025).
 213. Nuclear Technology Review 2024 [Электронный ресурс]. 2024. URL: <https://www.iaea.org/gc68/gc68inf4> (дата обращения: 14.11.2025).
 214. Safety and Economic Benefits of Accident Tolerant Fuel [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2315/ML23157A106.pdf> (дата обращения: 12.11.2025).
 215. Advanced Fuels Campaign Execution Plan [Электронный ресурс]. 2024. URL: https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_111779.pdf (дата обращения: 12.11.2025).

216. ADOPT™ Fuel | Westinghouse Nuclear [Электронный ресурс]. URL: <https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/adopt-fuel/> (дата обращения: 17.11.2025).
217. Westinghouse EnCore® ATF Program | Westinghouse Nuclear [Электронный ресурс]. URL: <https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/westinghouse-encore-atf-program/> (дата обращения: 18.11.2025).
218. TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth [Электронный ресурс] // Energy.gov. URL: <https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth> (дата обращения: 18.11.2025).
219. Advanced Gas Reactor Fuel Program's TRISO Particle Fuel Sets A New World Record For Irradiation Performance [Электронный ресурс] // Energy.gov. 2009. URL: <https://www.energy.gov/ne/articles/advanced-gas-reactor-fuel-programs-triso-particle-fuel-sets-new-world-record> (дата обращения: 18.11.2025).
220. Energy X. X-energy Begins Commercial Qualification Testing for TRISO-X Fuel at Idaho National Laboratory [Электронный ресурс] // X-energy. 2025. URL: <https://x-energy.com/media/news-releases/x-energy-begins-commercial-qualification-testing-for-triso-x-fuel-at-idaho-national-laboratory> (дата обращения: 18.11.2025).
221. BWXT set for production of advanced form of TRISO fuel [Электронный ресурс] // World Nuclear News. 2025. URL: <https://world-nuclear-news.org/articles/bwxt-set-for-production-of-advanced-form-of-triso-fuel> (дата обращения: 18.11.2025).
222. Framatome будет производить топливо TRISO во Франции [Электронный ресурс]. URL: <http://atominfo.ru/newsz09/a0016.htm> (дата обращения: 18.11.2025).
223. Energy U.-B. L. for the U. D. of. Progress on Matrix SiC Processing and Properties of Fully Ceramic Microencapsulated Fuel Form | ORNL [Электронный ресурс]. 2015. URL: <https://www.ornl.gov/content/progress-matrix-sic-processing-and-properties-fully-ceramic-microencapsulated-fuel-form> (дата обращения: 19.11.2025).
224. Ade B. J. и др. Ordered Particle Packing in Dense TRISO/SiC Fuel Elements and Preliminary Assessment of Neutronic and Thermomechanical Characteristics // Nucl. Sci. Eng. Taylor & Francis, 2022. Т. 196, № 12. С. 1517–1538.
225. PLM and Digital Transformation Trends for 2025 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.engineering.com/plm-and-digital-transformation-trends-for-2025/> (дата обращения: 18.11.2025).
226. Simulation and analysis market report unveils 8.8% growth in 2024 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.controleng.com/simulation-and-analysis-market-report-unveils-8-8-growth-in-2024/> (дата обращения: 18.11.2025).
227. Department of Nuclear Engineering. Advanced Modeling and Simulation. [Электронный ресурс] // The University of Tennessee, Knoxville. 2025. URL: <https://ne.utk.edu/research/advanced-modeling-and-simulation/> (дата обращения: 19.11.2025).

228. CAD [Электронный ресурс] // SRES. 2025. URL: <https://srespl.com/siemens/cad/> (дата обращения: 19.11.2025).
229. Siemens acquires Altair to create most complete AI-powered portfolio of industrial software [Электронный ресурс] // Siemens. 2025. URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-acquires-altair-create-most-complete-ai-powered-portfolio-industrial-software> (дата обращения: 17.11.2025).
230. Composite forming simulation [Электронный ресурс] // simutence. URL: https://www.simutence.de/virtual_process_chain/forming_simulation/ (дата обращения: 17.11.2025).
231. Вышла версия «Логос» 5.3.22 [Электронный ресурс] // TAdviser.ru. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:%D0%A0%D0%A4%D0%AF%D0%A6-%D0%92%D0%9D%D0%98%D0%98%D0%AD%D0%A4:_%D0%9F%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC_%D0%9B%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D1%81 (дата обращения: 20.11.2025).
232. Росатом презентовал первый тиражируемый цифровой продукт – «Логос Аэро-Гидро» | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2018/12/18/91311> (дата обращения: 20.11.2025).
233. Росатом анонсировал цифровой модуль «Логос Платформа» для интеграции ПО САЕ-класса от российских разработчиков [Электронный ресурс]: Новости. – Пресс-служба ЧУ «Цифрум», 2021. URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/rosatom-anonsiroval-tsifrovoy-modul-logos-platforma-dlya-integratsii-po-sae-klassa-ot-rossiyskikh-ra/> (дата обращения: 07.12.2022).
234. Пакет программ «Логос» интегрирован на цифровую платформу CML-Bench, разработанную Петербургским Политехом – CNews [Электронный ресурс] // CNews.ru. URL: https://www.cnews.ru/news/line/2025-06-06_paket_programm_logos_integrirovan (дата обращения: 20.11.2025).
235. MULTI-D [Электронный ресурс]. URL: <http://ase-ec.ru/products-and-services/multi-d/> (дата обращения: 20.11.2025).
236. «Росатом» создаёт автоматизированную систему управления для атомной станции малой мощности в Якутии / Хабр [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/news/763946/> (дата обращения: 20.11.2025).
237. «Росатом» стал совладельцем разработчика инженерного софта [Электронный ресурс] // РБК. 2025. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/05/03/2025/67c69b119a7947caad8c0e55 (дата обращения: 13.11.2025).
238. Росатом забирает рынок инженерного софта [Электронный ресурс] // Сетевой журнал «Цифровые Закупки». 2025. URL: <https://zakupki-digital.ru/nacionalnye-proekty/rosatom-zabiraet-rynok-inzhenernogo-softa/> (дата обращения: 13.11.2025).

239. Компания | Композитный дивизион Госкорпорации «Росатом» [Электронный ресурс]. URL: <https://rosatom-composites.ru/company/> (дата обращения: 20.11.2025).
240. Росатом в два раза увеличил объём поставок углеволокна для производства MC-21 [Электронный ресурс]. URL: <https://compositeworld.ru/articles/materials/id65afa98b95fb9a0019430c30> (дата обращения: 20.11.2025).
241. Композиты Росатома помогут обновить гражданский флот | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/10/22/160393> (дата обращения: 20.11.2025).
242. Полимерные композитные материалы для строительства [Электронный ресурс]. URL: <https://fibarm.ru/> (дата обращения: 20.11.2025).
243. Предсказатели материалов [Электронный ресурс]. URL: https://atomicexpertnew.ru/material_predictors (дата обращения: 21.11.2025).
244. Специальные материалы и технологии атомной энергетики | Национальный проект Новые атомные и энергетические технологии [Электронный ресурс] // Национальные проекты РФ. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/novye-atomnye-i-energeticheskie-tekhnologii/spetsialnye-materialy-i-tekhnologii-atomnoy-energetiki/> (дата обращения: 21.11.2025).
245. ИИ, блокчейн и устойчивые практики: как развивается российский рынок инженерного ПО - Исследования - 22.10.2024 [Электронный ресурс] // Strategy Partners. URL: <https://strategy.ru/research/research/ii-blokcheyn-i-ustoychivye-praktiki-kak-razvivaetsya-rossiyskiy-rynok-inzhenernogo-po-85/> (дата обращения: 21.11.2025).
246. Лихачев: успешная реализация проекта «Прорыв» закрепит мировое лидерство Росатома [Электронный ресурс] // ТАСС. URL: <https://tass.ru/ekonomika/12786255> (дата обращения: 20.11.2025).
247. Росатом на пороге революции: замкнутый ядерный топливный цикл – шаг к будущему атомной энергетики [Электронный ресурс]. URL: <https://xn---8sb0bfccht.xn--p1ai/tpost/0yja1rtkj1-rosatom-na-poroge-revolutsii-zamknutii> (дата обращения: 20.11.2025).
248. Реактор для научного прорыва [Электронный ресурс]. URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2025/09/22/reactor-for-scientific-breakthroughs/> (дата обращения: 20.11.2025).
249. Росатом скорректировал сроки строительства Якутской АЭС | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/01/13/152604> (дата обращения: 20.11.2025).
250. Путин анонсировал переход России к серийному выпуску малых АЭС | Новости [Электронный ресурс] // Известия. 2025. URL: <https://iz.ru/1993315/2025-11-19/putin-anonsiroval-perekhod-rossii-k-seriino-mu-vypusku-malykh-aes> (дата обращения: 20.11.2025).

251. МАГАТЭ пятый год подряд повышает прогнозы по глобальному росту атомной энергетики [Электронный ресурс] // Атомная энергия 2.0. 2025. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/09/15/159311> (дата обращения: 17.11.2025).
252. Global Energy and Climate Model – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model> (дата обращения: 19.11.2025).
253. World Energy Outlook 2024 – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (дата обращения: 19.11.2025).
254. World Energy Outlook 2025 – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025> (дата обращения: 19.11.2025).
255. The Path to a New Era for Nuclear Energy – Analysis [Электронный ресурс] // IEA. 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy> (дата обращения: 19.11.2025).
256. РЭА Минэнерго России представило сценарии развития мировой энергетики до 2050 года [Электронный ресурс] // ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. 2024. URL: <https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/rea-minenergo-rossii-predstavilo-stsenarii-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2050-goda> (дата обращения: 18.11.2025).
257. РЭА Минэнерго России опубликовало расширенную версию сценариев развития мировой энергетики до 2050 года [Электронный ресурс] // ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. 2024. URL: <https://rosenergo.gov.ru/press-center/news/rea-minenergo-rossii-opublikovalo-rasshirennuyu-versiyu-stsenariiev-razvitiya-mirovoy-energetiki-do-2> (дата обращения: 18.11.2025).
258. Энергетика до 2050 года: российская оценка [Электронный ресурс] // Государственная корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ». URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2024/06/28/energy-sector-2050-russian-forecast/> (дата обращения: 18.11.2025).
259. World Nuclear Performance Report 2025 – World Nuclear Association [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/world-nuclear-performance-report> (дата обращения: 14.11.2025).
260. Nuclear energy: How the world can triple capacity by 2050 [Электронный ресурс] // World Economic Forum. 2025. URL: <https://www.weforum.org/stories/2025/10/nuclear-energy-how-finance-policy-and-innovation-can-triple-capacity-by-2050/> (дата обращения: 19.12.2025).
261. Hodgson C. Uranium shortfall threatens nuclear energy renaissance, industry warned // Financial Times. 2025.
262. World Nuclear Industry Status Report [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.world-nuclearreport.org/> (дата обращения: 24.10.2025).
263. Nuclear energy: How the world can triple capacity by 2050 | World Economic Forum

- [Электронный ресурс]. URL: <https://www.weforum.org/stories/2025/10/nuclear-energy-how-finance-policy-and-innovation-can-triple-capacity-by-2050/> (дата обращения: 19.12.2025).
264. A New Nuclear World: How Small Modular Reactors Can Power Industry [Электронный ресурс] // LucidCatalyst. 2025. URL: <https://www.lucidcatalyst.com/post/new-study-from-lucidcatalyst-shows-significant-potential-market-for-smrs-providing-net-zero-solution> (дата обращения: 18.11.2025).
265. Перспективы использования малых модульных реакторов для ЦОД [Электронный ресурс] // Российский совет по международным делам. URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/interview/perspektivy-ispolzovaniya-malykh-modulnykh-reaktorov-dlya-tsod/> (дата обращения: 18.11.2025).
266. РЭА Минэнерго РФ: прирост использования атомной энергии к 2050 году может составить 56% [Электронный ресурс] // Энергетика и промышленность России. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2025/8886640.htm> (дата обращения: 18.11.2025).
267. Composite Simulation Software Market Size, Share & Trends Analysis 2033 [Электронный ресурс] // Market Research Intellect. URL: <https://www.marketresearchintellect.com/product/global-composite-simulation-software-market-size-and-forecast/> (дата обращения: 28.10.2025).
268. Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года (утв. Правительством Российской Федерации) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_495719/ (дата обращения: 20.11.2025).
269. Шесть вызовов ближайших шести лет: в «Росатоме» прошел день информирования [Электронный ресурс] // Страна Росатом: Отраслевое издание госкорпорации «Росатом». URL: <https://strana-rosatom.ru/2025/03/10/shest-vyzovov-blizhajshih-shesti-let-v-r/> (дата обращения: 21.11.2025).
270. Школьный атом [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. 2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7312096> (дата обращения: 21.11.2025).
271. Как «Росатом» реализует зарубежные проекты вопреки санкциям [Электронный ресурс] // Эксперт.Медиа. URL: <https://expert.ru/promishlennost/aes-ne-srazu-stroyatsya/> (дата обращения: 21.11.2025).
272. Новая атомная энергетика | Национальный проект Новые атомные и энергетические технологии [Электронный ресурс] // Национальные проекты РФ. URL: <https://национальные-проекты.рф/new-projects/novye-atomnye-i-energeticheskie-tekhnologii/novaya-atomnaya-energetika/> (дата обращения: 21.11.2025).
273. Экспериментально-стендовая база для разработки технологий двухкомпонентной атомной энергетики | Национальный проект Новые атомные и энергетические технологии [Электронный ресурс] // Национальные проекты РФ. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/novye-atomnye-i-energeticheskie-tekhnologii/eksperimentalno-stendovaya-baza->

- dlya-razrabotki-tekhnologiy-dvukhkomponentnoy-atomnoy-energetiki/ (дата обращения: 21.11.2025).
274. Технологии термоядерной энергетики | Национальный проект Новые атомные и энергетические технологии [Электронный ресурс] // Национальные проекты РФ. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/novye-atomnye-i-energeticheskie-tekhnologii/tekhnologii-termoyadernoy-energetiki/> (дата обращения: 21.11.2025).
 275. Серийная референтность атомных электростанций большой и малой мощности | Национальный проект Новые атомные и энергетические технологии [Электронный ресурс] // Национальные проекты РФ. URL: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/novye-atomnye-i-energeticheskie-tekhnologii/seriyaya-referentnost-atomnykh-elektrostantsiy-bolshoy-i-maloy-moshchnosti/> (дата обращения: 21.11.2025).
 276. Код цифровой экономики: рынок программного обеспечения и ИТ-услуг [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://b1.ru/upload/sprint.editor/9f4/457ho11svspevb0s5u9j4e10vfle4gd6/b1-software-and-it-services-in-russia-research-2025.pdf.pdf> (дата обращения: 27.11.2025).
 277. Софт у станка [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. 2025. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7691784> (дата обращения: 21.11.2025).
 278. Объем отечественного рынка промышленного софта вырос и достиг 60 миллиардов [Электронный ресурс] // CNews.ru. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2025-04-28_obem_otechestvennogo_rynka (дата обращения: 21.11.2025).
 279. Тюнинг: автоматизация и цифровизация увеличивают спрос на композиты [Электронный ресурс]. URL: <https://rosatom-composites.ru/news/tyunin-avtomatizatsiya-i-tsifrovizatsiya-uvlechivayut-spros-na-kompozity/> (дата обращения: 21.11.2025).
 280. Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года» [Электронный ресурс] // Правительство России. 2025. URL: <http://government.ru/news/48570/> (дата обращения: 21.11.2025).
 281. Федеральный закон от 28.12.2024 № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Президент России. 2025. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/51500> (дата обращения: 21.11.2025).
 282. ГОСТ Р 57700.42–2023 «Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Общие положения». [Электронный ресурс] // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2023. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=257099> (дата обращения: 19.10.2025).
 283. ТЕХНОПРОМ-2025: Алексей Боровков представил достижения ПИШ СПбПУ в области термопластичных полимерных композиционных материалов и её подход к созданию новых материалов с помощью технологии цифровых двойников | ПИШ СПбПУ «Цифровой инжиниринг» [Электронный ресурс]. URL: <https://pish.spbstu.ru/news/9196> (дата обращения: 21.11.2025).

284. Предсказатели материалов или перспективы цифрового материаловедения [Электронный ресурс]. URL: <https://naukarosatom.ru/news/predskazateli-materialov/> (дата обращения: 21.11.2025).
285. Жизнь после 40: о продлении срока эксплуатации АЭС в мире | Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2025/11/10/160890> (дата обращения: 18.11.2025).
286. Agency (IAEA) I. A. E. Official Web Site of the IAEA [Электронный ресурс]: text. International Atomic Energy Agency (IAEA). URL: <http://www.iaea.org/> (дата обращения: 18.11.2025).
287. Bloomberg узнал о планах Лондона запустить масштабную ядерную программу [Электронный ресурс] // РБК. 2025. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/689c71aa9a79479e93316b7e> (дата обращения: 18.11.2025).
288. Обновление Hinkley Point C — 23.01.2024 | EDF FR [Электронный ресурс]. URL: <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/hinkley-point-c-update-1> (дата обращения: 18.11.2025).
289. Small modular reactors | Darlington SMR [Электронный ресурс] // OPG. URL: <https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr/darlington-smr/> (дата обращения: 18.11.2025).
290. Батуевич Р. О. Энергетическая стратегия Японии в условиях глобальной нестабильности и четвертого энергоперехода: 1 (18) // Социальные Новации И Социальные Науки. Россия, Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт научной информации по общественным наукам Российской академии наук», 2025. № 1 (18). С. 79–94.
291. Правительство утвердило Концепцию технологического развития до 2030 года [Электронный ресурс]. 2025. URL: <http://government.ru/docs/48570/> (дата обращения: 12.11.2025).
292. Специальные материалы и технологии атомной энергетики | Национальный проект Новые атомные и энергетические технологии [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/novye-atomnye-i-energeticheskie-tekhnologii/spetsialnye-materialy-i-tekhnologii-atomnoy-energetiki/> (дата обращения: 17.11.2025).
293. Белая книга ядерной энергетики. — 2001 / Просмотр издания // Электронная библиотека /// История Росатома [Электронный ресурс] // Электронная библиотека /// История Росатома. 2025. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/belaya-kniga-yadernoy-energetiki_2001/ (дата обращения: 27.11.2025).
294. Георгиевич О. И., Юрьевна Б. М., Викторович М. А. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций (обзор): 4 (13) // Вестник Евразийской Науки. Россия, Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский центр «Науковедение», 2012. № 4 (13). С. 98.

295. Humphrey U. E., Khandaker M. U. Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: Issues and prospects [Электронный ресурс] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118305951> (дата обращения: 13.11.2025).
296. Teichmann T. и др. First-principles investigation of neutron-irradiation-induced [Электронный ресурс] // EPJ Web of Conferences. 2018. URL: <https://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/201817009012> (дата обращения: 13.11.2025).
297. You Y., Yoshida K., Yano T. First-principles investigation of neutron-irradiation-induced point defects in B₄C, a neutron absorber for sodium-cooled fast nuclear reactors // Jpn. J. Appl. Phys. 2018. Т. 57, № 5. С. 055801.
298. Zhou W., Zhou W. Enhanced thermal conductivity accident tolerant fuels for improved reactor safety – A comprehensive review [Электронный ресурс] // Annals of Nuclear Energy. 2018. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306454918302251> (дата обращения: 13.11.2025).
299. Snead L. L. и др. Stored energy release in neutron irradiated silicon carbide [Электронный ресурс] // Journal of Nuclear Materials. 2019. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311518313588> (дата обращения: 13.11.2025).
300. 2017 Water Reactor Fuel Performance Meeting [Электронный ресурс]. URL: https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:IDRlifTWxKoJ:scholar.google.com/&hl=en&as_sdt=0,5 (дата обращения: 13.11.2025).
301. Dienst W. Reduction of the mechanical strength of Al₂O₃, AlN and SiC under neutron irradiation [Электронный ресурс] // Journal of Nuclear Materials. 1992. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311509801074> (дата обращения: 13.11.2025).
302. Kong X. и др. Effects of recording time and residue on dose-response by LiMgPO₄: Tb, B ceramic disc synthesized via improved sintering process [Электронный ресурс] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2018. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X18301605> (дата обращения: 13.11.2025).
303. Ranasinghe J. I. и др. Study on Radial Temperature Distribution of Aluminum Dispersed Nuclear Fuels: U₃O₈-Al, U₃Si₂-Al, and UN-Al [Электронный ресурс] // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. 2018. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/nuclearengineering/article/doi/10.1115/1.4039886/368934/Study-on-Radial-Temperature-Distribution-of> (дата обращения: 13.11.2025).
304. He S. и др. Ceramic oxide coating formed on beryllium by micro-arc oxidation [Электронный ресурс] // Corrosion Science. 2017. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X1631280X> (дата обращения: 13.11.2025).

- 13.11.2025).
305. Lu C. и др. Microstructure evolution and brazing mechanisms of the Ti2AlC/Ni joints using nickel based filler alloy [Электронный ресурс] // Journal of the European Ceramic Society. 2016. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221916302643> (дата обращения: 13.11.2025).
 306. Kozlovskiy A. и др. Investigation of the influence of irradiation with Fe ⁺⁷ ions on structural properties of AlN ceramics [Электронный ресурс] // Materials Research Express. 2018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/aac7ba> (дата обращения: 13.11.2025).
 307. Kozlovskiy A. и др. Dynamics of changes in structural properties of AlN ceramics after Xe+22 ion irradiation [Электронный ресурс] // Vacuum. 2018. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X18305165> (дата обращения: 13.11.2025).
 308. Ostovari Moghaddam A., Cabot A., Trofimov E. A. Does the pathway for development of next generation nuclear materials straightly go through high-entropy materials? // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2021. Т. 97. С. 105504.
 309. Росатом выпустил обновленную версию программного пакета «Логос» | Новости науки [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--80aa3ak5a.xn--p1ai/news/rosatom-vypustil-obnovlennuyu-versiyu-programmnogo-paketa-logos/> (дата обращения: 18.11.2025).
 310. Dimitrienko Y. I. и др. Universal models of the constitutive relations for transversely isotropic compressible composites with finite strains [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/934/1/012012> (дата обращения: 19.12.2025).
 311. Димитриенко Ю. И., Соколов А. П. Многомасштабное моделирование упругих композиционных материалов // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. С. 3–20.
 312. Грищенко А. И., Игнатович И. А., Петросян О. Л. Оптимизация микроструктуры композиционных материалов с учетом ограничений на их свойства. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 2023.
 313. Белов Д. А. Гомогенизация и гетерогенизация однонаправленных упругих волокнистых композитов [Электронный ресурс]. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/1817.pdf/view> (дата обращения: 05.05.2025).
 314. Соколов А. П. и др. Гомогенизация многоуровневых многокомпонентных гетерогенных структур для определения физико-механических характеристик композиционных материалов. Физическая мезомеханика, 2018.
 315. Shahapure N., Shinde D., Kelkar A. Atomistic modeling and molecular dynamic simulation of polymer nanocomposites for thermal and mechanical property characterization: A review: 2 // AIMS Mater. Sci. 2023. Т. 10, № 2. С. 249–287.

316. LLorca J. и др. Multiscale Modeling of Composites: Toward Virtual Testing ... and Beyond: 2 // JOM. 2013. Т. 65, № 2. С. 215–225.
317. Oñate E., Owen R. Computational Plasticity. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. 268 с.
318. Antin K.-N. и др. A Multiscale Modelling Approach for Estimating the Effect of Defects in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: 12 // Materials. 2019. Т. 12, № 12. С. 1885.
319. Тренды и перспективы развития цифрового проектирования и моделирования (включая цифровые технологии моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов). Экспертно-аналитический доклад: монография / А. И. Боровков [и др.]; под ред. канд. техн. наук А. И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 140 с. [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://technet.spbstu.ru/article/trendy-i-perspektivy-razvitiya-cifrovogo-proektirovaniya-i-modelirovaniya> (дата обращения: 16.10.2025).
320. Ozhgibesova D. и др. Digital twins of composite materials // XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 PROCEEDINGS Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics. Saint-Petersburg: IKP «NP-PRINT», 2024. С. 289–294.
321. Тренды и перспективы развития цифрового проектирования и моделирования (включая цифровые технологии моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов). Экспертно-аналитический доклад: монография / А. И. Боровков [и др.]; под ред. канд. техн. наук А. И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 140 с. [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://technet.spbstu.ru/article/trendy-i-perspektivy-razvitiya-cifrovogo-proektirovaniya-i-modelirovaniya> (дата обращения: 16.10.2025).
322. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 7: разработка и применение цифровых двойников композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://sapr.ru/article/26846> (дата обращения: 27.10.2025).
323. Атом Медиа | Пресс-релизы | Ученые «Росатома» разработали единую базу данных свойств материалов для 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: <https://atommedia.online/press-releases/uchenye-rosatoma-razrabotali-edinuyu-bazu-dannykh-svoystv-materialov-dlya-3d-pechat/> (дата обращения: 06.11.2025).
324. Б. Д. Аннин и др. Расчет и проектирование композиционных материалов и элементов конструкций. РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева / под ред. Отв. ред. Ю. С. Уржумцев, Institut gidrodinamiki imeni M.A. Lavrent'eva. Новосибирск: Наука, 1993. 256 с.
325. Ю. И. Димитриенко, А. П. Соколов,. Многомасштабное моделирование упругих композиционных материалов // Матем. моделирование. 2012. Т. 24. С. 3–20.
326. Димитриенко Ю. И. Механика сплошной среды: учеб. пособие в 4 т. Т. 2: Универсальные

- законы механики и электродинамики сплошных сред. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 559 с.
327. Ю.и Д. и др. Численное моделирование и экспериментальное исследование деформирования упругопластических пластин при смятии: 1 (5) // Математическое Моделирование И Численные Методы. Россия, Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 2015. № 1 (5). С. 67–82.
 328. D3039/D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://store.astm.org/d3039_d3039m-17.html (дата обращения: 27.11.2025).
 329. D3410/D3410M Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://store.astm.org/d3410_d3410m-16e01.html (дата обращения: 27.11.2025).
 330. D3518/D3518M Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://store.astm.org/d3518_d3518m-18.html (дата обращения: 27.11.2025).
 331. D5528 Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://store.astm.org/d5528-01r07e03.html> (дата обращения: 27.11.2025).
 332. D7905-Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://store.astm.org/rr-d30-1006.html> (дата обращения: 27.11.2025).
 333. Компактный источник чистой энергии. Почему за малыми АЭС будущее? [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://strana-rosatom.ru/2024/08/21/kompaktnyj-istochnik-chistoj-energii-p/> (дата обращения: 12.11.2025).
 334. Pannier C. P., Skoda R. Comparison of Small Modular Reactor and Large Nuclear Reactor Fuel Cost // Energy Power Eng. Scientific Research Publishing, 2014. Т. 6, № 5. С. 82–94.
 335. Жидкосолевой реактор: от «бумаги» к «железу» [Электронный ресурс]. URL: http://atomicexpert.com/zhidkosolevoy_reaktor (дата обращения: 12.11.2025).
 336. Глоссарий | ПИШ СПбПУ «Цифровой инжиниринг» [Электронный ресурс]. URL: <https://pish.spbstu.ru/article/glossarij> (дата обращения: 19.12.2025).

ИЗДАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СПБПУ



Тенденции и перспективы развития технологий «умного» производства. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, Е.Р. Мартынец, Л.А. Щербина, Ю.А. Рябов; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 184 с.



Обзор применяемых технологий проведения цифровых испытаний элементов беспилотных систем в России и странах-участницах БРИКС. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, М.Ю. Корчков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 248 с.



Обзор технологий цифрового моделирования композиционных материалов для применения в атомной отрасли. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 176 с.



Популяризация инструментов цифрового инжиниринга в деятельности современного инженерного университета в рамках концепции достижения технологического лидерства России: монография / под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 206 с.





Функциональные характеристики отечественных средств информационного моделирования (BIM). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на апрель 2025 года): монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 244 с.



Функциональные характеристики отечественных систем управления производством (MES-систем) для дискретных производств. Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на апрель 2025 года): монография / А.И. Боровков [и др.]; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 244 с.



Функциональные характеристики отечественных систем технологической подготовки производства (CAPP-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на апрель 2025 года): монография / А.И. Боровков [и др.]; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 226 с.



Тренды и перспективы развития цифрового проектирования и моделирования (включая цифровые технологии моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов). Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, Е.Р. Мартынец, Л.А. Щербина, Е.Р. Хуторцова, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, Л.А. Нездоймышапко, Д.Д. Ожгибесова, Е.П. Чхеидзе, И.И. Поняева, Е.И. Павлова, О.И. Рождественский; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 140 с.





Обзор цифровых технологий обеспечения эксплуатации композитных и гибридных конструкций БВС. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, М.Ю. Корчков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 262 с.



Перспективы и сценарии развития промышленной робототехники в рамках направления «Технет» НТИ в 2024 году. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, Л.А. Щербина, Е.Р. Мартынец, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, А.М. Трапезникова, Л.А. Нездоймышапко; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 122 с.



Перспективы и сценарии развития цифровых платформ в рамках направления «Технет» НТИ в 2024 году. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, Е.Р. Мартынец, Л.А. Нездоймышапко, Л.А. Щербина, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин, Е.Р. Хуторцова; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 164 с.



Анализ рынка систем управления процессами и данными компьютерного моделирования (SPDM-систем) в рамках направления «Технет» НТИ. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, А.Х. Кайданова, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали, К.В. Кукушкин, П.В. Скопин; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 169 с.





Анализ рынка систем инженерного анализа (CAE-систем), в том числе использующих технологии искусственного интеллекта, в рамках направления «Технет» НТИ. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, А.Х. Кайданова, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали, К.В. Кукушкин, А.А. Михайлов, И.Б. Войнов, С.Д. Чишко, А.Д. Новокшенов; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 219 с.



Анализ рынка систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем) в рамках направления «Технет» НТИ. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, А.Х. Кайданова, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали, К.В. Кукушкин, В.Н. Будилов, П.В. Скопин; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 204 с.



Анализ рынка систем управления производством (MES-систем) в рамках направления «Технет» НТИ. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, А.Х. Кайданова, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали, К.В. Кукушкин, В.П. Шкодырев, В.Н. Хохловский, Е.А. Башкирова, А. Диб, П. Жан-Зуауи, И.А. Скогликов, И.В. Бевз, Д.Я. Чавелипарамбил; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 208 с.





Анализ рынка систем диспетчерского управления технологическими процессами и сбором данных (SCADA) в рамках направления «Технет» НТИ: монография / А.И. Боровков, О.И. Рождественский, Е.И. Павлова, И.И. Поняева, А.Х. Кайданова, Е.П. Чхеидзе, А.А. Старостенко, П.С. Распопина, А.С. Голякевич, С.А. Чварков, Н.М. Луковникова, И.Б. Андреев, А.О. Ольховик, П.А. Джелали, К.В. Кукушкин, В.П. Шкодырев, В.Н. Хохловский, Е.А. Башкирова, А. Диб, П. Жан-Зуауи, И.А. Скогликов; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 243 с.



Тренды и сценарии развития рынка систем расширенного планирования производства (APS-систем) в рамках направления «Технет» НТИ. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.А. Корчевская, А.Т. Хуторцова, С.Н. Гудырин, А.В. Морозов, А.В. Чеславский, И.Б. Гиндин, А.М. Шакин, А.Р. Залыгин, Н.И. Прытков, А.М. Трапезникова, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 112 с.



Исследование рынка цифровых платформ для оптовой торговли в странах БРИКС и Ближнего Востока. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.Т. Хуторцова, А.А. Корчевская, Е.Н. Дьяченко, Н.И. Прытков, А.М. Трапезникова, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 144 с.



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; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 184 с.





Функциональные характеристики отечественных систем автоматизированного проектирования (CAD-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 (CAM-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 промышленного 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, Е.Р. Мартынец, Л.А. Щербина, Н.И. Прытков, А.А. Корчевская, А.Т. Хуторцова, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 204 с.



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, Л.А. Щербина, Е.Р. Мартынец, А.А. Корчевская, А.Т. Хуторцова, Н.И. Прытков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 116 с.



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, Л.А. Щербина, Е.Р. Мартынец, А.А. Корчевская, А.Т. Хуторцова, Н.И. Прытков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 108 с.





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; под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.



Цифровые двойники: вопросы терминологии / А.И. Боровков, А.А. Гамзикова, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 28 с.

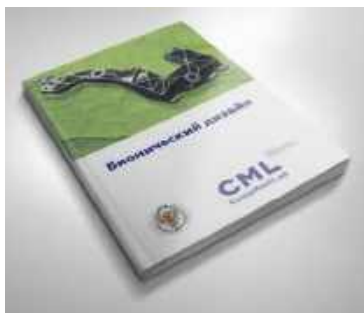


Передовые производственные технологии: возможности для России. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, К.В. Кукушкин, А.А. Корчевская, А.Т. Хуторцова, Л.А. Щербина, Ю.А. Рябов, С.В. Салкуцан, Е.О. Касяненко, И.С. Метревели, К.О. Вишневский, Ю.В. Туровец, М.С. Липецкая, Д.В. Санатов, Н.С. Андреева, Е.А. Римских, В.А. Пастухов, Н.В. Гоголь, М.А. Королькова под ред. А.И. Боровкова. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 436 с.



Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Краткий доклад (сентябрь 2019 года): монография / А.И. Боровков, А.А. Гамзикова, К.В. Кукушкин, Ю.А. Рябов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 62 с.





Бионический дизайн: монография / А.И. Боровков, В.М. Марусева, Ю.А. Рябов, Л.А. Щербина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 92 с.



Современное инженерное образование / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.



Компьютерный инжиниринг / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.



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
Рождественский Олег Игоревич
Павлова Елизавета Ивановна
Поняева Ирина Игоревна
Чхеидзе Екатерина Павловна
Старостенко Анастасия Андреевна
Распопина Полина Станиславовна
Голякевич Артем Сергеевич
Чварков Сергей Анатольевич
Луковникова Наталья Михайловна
Андреев Иннокентий Борисович
Ольховик Александра Олеговна
Джелали Полина Александровна*

**ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ
ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ДОКЛАД**

Монография

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 25.12.2025. Формат 60×84/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 22,0. Тираж 300. Заказ 6079.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.