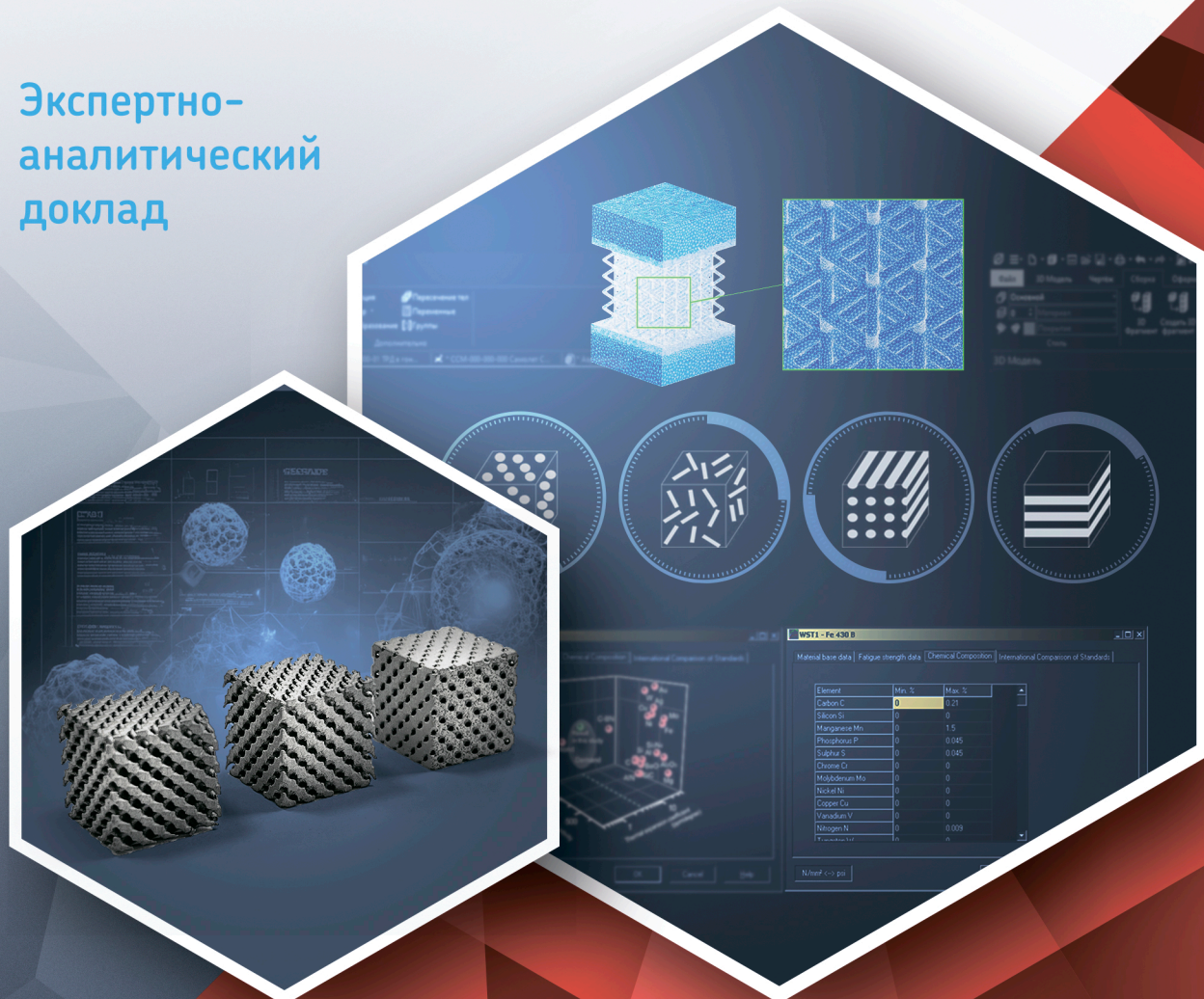
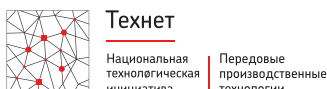


Тренды и перспективы развития цифрового проектирования и моделирования

(включая цифровые технологии моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов)

Экспертно-аналитический доклад





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



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2025

УДК 004.94
ББК 32.972
Т66

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-образовательного центра
«Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов»
(НОЦ «СИМПЛЕКС») МГТУ им. Н. Э. Баумана, заведующий кафедрой «Вычислительная математика
и математическая физика» МГТУ им. Н. Э. Баумана
Ю. И. Димитриенко

Кандидат технических наук, доцент Высшей школы механики и процессов управления
Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
А. Д. Новокшенов

Авторы:

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

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.

Содержит результаты исследования, посвященного трендам и перспективам развития рынка цифрового проектирования и моделирования материалов, включая композиционные материалы, и фокусируется на решениях для промышленного сектора. В монографии рассмотрены общие характеристики изучаемого рынка, основные игроки и их новые крупные проекты, а также ключевые технологии, применяемые мировыми лидерами, и направления научных исследований и разработок. Кроме того, представлен анализ нормативного правового регулирования развития рынка цифрового проектирования и моделирования материалов, соответствующего национального и международного нормативно-технического ландшафта.

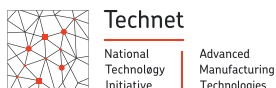
Подготовлена Инфраструктурным центром «Технет» (передовые производственные технологии) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Печатается по решению

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

ISBN 978-5-7422-9070-4
doi:10.18720/SPBPU/2/id25-257

© Боровков А. И., научное редактирование, 2025
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2025



NTI TECHNET'S DIGITAL DESIGN, SIMULATION
AND MODELING MARKET: TRENDS AND PROSPECTS.
A CASE STUDY OF SOFTWARE TOOLS FOR SIMULATING
ENGINEERED COMPOSITE PRODUCTS
AND DEVELOPING COMPOSITE MATERIALS
DIGITAL TWINS

AN EXPERT AND RESEARCH REPORT

Monograph



St. Petersburg
2025

Reviewed by:

Yu. I. Dimitrienko, Director of the SIMPLEX (Supercomputer Engineering Modeling and Software Development) Scientific and Educational Center at Bauman Moscow State Technical University, Chair of the Bauman Moscow State Technical University Computational Mathematics and Mathematical Physics Department, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor

A. D. Novokshenov, Associate Professor of the Graduate School of Mechanics and Control Processes at the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Institute of Physics and Mechanics, Candidate of Sciences in Engineering

Authored by:

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

NTI Technet's Digital Design, Simulation and Modeling Market: Trends and Prospects. A Case Study of Software Tools for Simulating Engineered Composite Products and Developing Composite Materials Digital Twins. An Expert and Research Report : monograph / A. I. Borovkov [et al.] ; ed. by A. I. Borovkov. – St. Petersburg : POLYTECH-PRESS, 2025. – 140 p.

This monograph provides analysis and insight on the market for digital design, simulation and modeling of materials, with a particular focus on software tools for simulating composite materials in manufacturing. It outlines the market landscape by highlighting key players, detailing their product and service offerings, and profiling significant projects. A separate section explores R&D activities in materials digital design, simulation and modeling, showcasing core technologies employed by leading global companies. The authors also examine the relevant legislative and regulatory framework together with national and international standards.

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

Approved for printing by the Publishing Council of the
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Academic Council.

ISBN 978-5-7422-9070-4

doi:10.18720/SPBPU/2/id25-257

© Borovkov A. I., scientific editing, 2025

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК РИСУНКОВ	6
СПИСОК ТАБЛИЦ.....	8
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	19
ГЛАВА 2. ОБЗОР ОСНОВНЫХ ИГРОКОВ РЫНКА ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	39
ГЛАВА 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	59
ГЛАВА 4. ОБЗОР НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	71
4.1. Подходы к определению цифрового двойника материала (ЦД материала).....	73
4.2. Подходы к моделированию материалов.....	78
4.3. Возможности существующих цифровых продуктов для моделирования материалов.....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ИГРОКОВ РЫНКА ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	90
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПРОФ. А.И. БОРОВКОВЫМ В СОАВТОРСТВЕ С ДРУГИМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯМИ.....	93
БИБЛИОГРАФИЯ.....	104

СПИСОК РИСУНКОВ

Рисунок 1. Иерархия масштабов (уровней) описания материала с позиции времени и характерных размеров	15
Рисунок 2. Одна из возможных схем сегментации рынка технологий цифрового проектирования.....	20
Рисунок 3. Объем рынка программного обеспечения моделирования и информатики материалов, 2022, млн долл.	21
Рисунок 4. Темпы роста рынка программного обеспечения моделирования и информатики материалов, 2022–2030, млн долл.	22
Рисунок 5. Цифровой двойник материала в соответствии с подходом авторов из Рейнско-Вестфальского технического университета Ахен	26
Рисунок 6. Динамика изменения количества научных публикаций в области цифрового проектирования и моделирования материалов, ед., 2010–2025 гг.	36
Рисунок 7. Количество научных публикаций в области цифрового проектирования и моделирования материалов по странам, ед., 2010–2025 гг.....	36
Рисунок 8. Количество научных публикаций в области цифрового проектирования и моделирования материалов по организациям, ед., 2010–2025 гг.....	36
Рисунок 9. LDA-модель доминирующих тематик в научных публикациях в области цифрового проектирования и моделирования материалов, ед., 2010–2025 гг.	37
Рисунок 10. Моделирование материала в Digimat на макро-, мезо- и микроуровне.....	44
Рисунок 11. Полный цикл моделирования композитных конструкций с помощью ПК «Манипула».....	48
Рисунок 12. Общая выручка компаний НТИ, специализирующихся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования новых материалов (2019–2023 гг., млн руб.).....	51
Рисунок 13. Средняя выручка по медиане компаний НТИ, специализирующихся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования новых материалов (2019–2023 гг., млн руб.).....	51
Рисунок 14. Моделирование изделий инструментами Ansys с учетом анализа свойств материалов инструментами Schrödinger на разных уровнях детализации.....	54
Рисунок 15. Международный и национальный нормативно-технический ландшафт по направлению моделирования материалов	70
Рисунок 16. Пояснения к подходу MITT и мета-структуре.....	74
Рисунок 17. Схема решения задач [А] и [Б] с применением систем «Цифровой двойник материала» – «Цифровой двойник изделия».....	78
Рисунок 18. Двухуровневая структура тканевого композиционного материала	80

Рисунок 19. Концепция уровней многомасштабного моделирования	82
Рисунок 20. Представление трехфазной микроструктуры: алгоритмически разделенные волокна (fiber), интерфейс (interface), добавленный к периметру волокон, и смола (resin), заполняющая остальную часть.....	83
Рисунок 21. Представление о мезоуровне на примере ВПКМ	85
Рисунок 22. Слияние двух парадигм (триад): «Материал-Технология-Конструкция» и «Разработка-Производство-Эксплуатация» на примере разработки цифровых моделей композиционных материалов (ЦМКМ)	88

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1. Сегментация основных игроков рынка цифрового проектирования и моделирования материалов с фокусировкой на композиционные материалы	39
Таблица 2. Подходы к определению термина «цифровой двойник материала».....	73
Таблица 3. Оценка возможности моделирования свойств и технологии для полимерных композиционных материалов в соответствии с выделенными уровнями моделирования для класса ВПКМ.....	86
Таблица 4. Сегментация основных игроков рынка цифрового проектирования и моделирования материалов	90

ВВЕДЕНИЕ

Аналитическое исследование рынка и сегментов рынка «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)» подготовлено Инфраструктурным центром по развитию направления Национальной технологической инициативы «Технет» (передовые производственные технологии), созданным в 2024 году на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Технологии цифрового проектирования и моделирования – один из ключевых сегментов направления «Технет» НТИ, который охватывает совокупность технологий компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD) [1], компьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE) [2], разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ (Computer-Aided Manufacturing, CAM) [3], управления данными об изделии (Product Data Management, PDM) и управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM) [4]. Наряду со стремительно развивающейся технологией цифровых двойников (Digital Twin) [5] с рекордным ростом рынка (CAGR) 61,5%, который в 2028 году превысит уровень 110 млрд долларов, данный сегмент играет ключевую роль в цифровой трансформации высокотехнологичной промышленности и выступает эффективным инструментом для формирования конкурентных преимуществ, что неоднократно отмечали эксперты и специалисты из различных отраслей промышленности.

В Приложении 2 представлен перечень 132 научных публикаций проф. А.И. Боровкова с соавторами в 1985–2024 гг., то есть за 40-летний период, в которых рассмотрены и исследованы многие актуальные вопросы вычислительной механики композиционных материалов и композитных структур, а также вопросы математического и компьютерного моделирования многоуровневого описания и поведения микро- и макро- неоднородных гетерогенных материалов и структур с анизотропными компонентами. Особое внимание в публикациях уделяется методам многоуровневой гомогенизации, определения эффективных физико-механических характеристик реальных композитов и последовательной гетерогенизации, а также применению этих подходов для решения инженерных и промышленных задач. Эти публикации и опыт реализации НИР и НИОКР в интересах высокотехнологичной промышленности частично были использованы в написании настоящего экспертно-аналитического доклада.

Передовое цифровое проектирование и моделирование, особенно, на основе технологии цифровых двойников, обеспечивает снижение времени вывода продукции на рынок и себестоимости разработки продукции, повышает обоснованность принимаемых решений за счет выполнения всей деятельности на цифровых платформах, обеспечивающих формирование целостного информационного пространства, которые в свою очередь становятся одним из основных конкурентных преимуществ в решении национальной задачи и достижении целей **технологического лидерства – превосходства технологий и / или продукции по основным параметрам (функциональным, техническим, стоимостным) над зарубежными аналогами.**

Объектом цифрового проектирования и моделирования выступают изделия как сложные технические системы, киберфизические системы, машины, конструкции, установки, сооружения, подсистемы и компоненты, детали и узлы, протекающие физико-механические процессы, как «внутренние», так и «внешние» и, конечно же, материалы, из которых изготовлены все технические объекты.

Моделирование материалов (Materials Modeling, Materials Simulation) – технология на стыке двух научных направлений – вычислительная механика (Computational Mechanics) и цифровое материаловедение (Computational Materials Science), а также сегментов направления «Технет» НТИ: цифрового проектирования и моделирования как совокупности обозначенных выше технологий [6] и материаловедения. Моделирование материалов (особенно, Materials Simulation) совместно с многоуровневым (многомасштабным) анализом (Multiscale Analysis) предназначено для создания и эффективного применения материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками в изделиях, в том числе композиционных материалов в композитных структурах.

Отметим, что рынок композиционных материалов (КМ) является одним из быстрорастущих сегментов рынка новых материалов [7]. Исследованию данного междисциплинарного направления развития рынка цифрового проектирования и моделирования материалов и посвящен настоящий экспертно-аналитический доклад.

В общем виде моделирование материалов, сформированное на сопряжении и конвергенции подходов и методов вычислительной механики, вычислительной физики и цифрового материаловедения подразумевает анализ свойств и характеристик материалов на разных уровнях (масштабах) детализации:

- **электронный уровень** – фундаментальный уровень, связанный с поведением отдельных электронов и атомных ядер в соответствии с законами квантовой механики; это область физики элементарных частиц, изучающей структуру, свойства и взаимодействия элементарных частиц, не имеющих внутренней структуры и не состоящих из более мелких частиц; к понятию и термину «материал», этот уровень, вообще говоря, явно не относится и в многоуровневых описаниях материалов не используется, особенно, в практических задачах промышленности.
- **атомистический / атомарный уровень** – уровень, который сфокусирован на взаимодействии отдельных атомов и молекул в соответствии с положениями классической механики, где атомы рассматриваются как точечные массы с межатомными потенциалами, которые представляют силы, действующие между ними; анализ на данном уровне позволяет моделировать движение атомов во времени с применением методов молекулярной динамики, изучать структуру и свойства материалов (кристаллов, полимеров, жидкостей), исследовать динамику биологических систем, взаимодействие химических веществ и др.; дополнительно также выделяют молекулярный уровень, тесно связанный с атомарным, однако исследующий уровень молекулярных систем и используемый для моделирования химических соединений, где требуется фокусировка на внутримолекулярных взаимодействиях и особенностях молекулярной структуры – с точки зрения высокотехнологичных изделий современной промышленности, представленных на «макроуровне», входит в обобщенное понятие «микроуровень»;

- микроуровень, μ -уровень**, особенно в композиционных материалах (КМ), – чрезвычайно важный уровень рассмотрения и изучения КМ, на котором ключевую роль играют характерные размеры отдельных компонентов микронеоднородных КМ – отдельных армирующих элементов (включений, наполнителей), как дискретных включений (дискретно-армированные или гранулированные КМ, причем, как с регулярной структурой, например, 1D, 2D, 3D периодические КМ, так и с нерегулярной структурой, например, хаотически армированные КМ или стохастические КМ), так и непрерывных включений (волокнуистые КМ, ортогонально- или перекрестно-армированные КМ, волокнуисто-слоистые КМ с разными углами ориентации волокон в отдельных слоях, текстильные КМ с разными способами плетения). Примерами КМ с трехмерной структурой армирования выступают КМ, у которых армирующие волокна ориентированы или по трем ортогональным направлениям (3D КМ), или по четырем диагоналям куба (4D КМ) или по трем ортогональным направлениям и четырем диагоналям куба (7D КМ). В качестве характерных масштабов (размеров) могут выступать диаметры волокон, расстояния между волокнами, характерные размеры эллипсоидальных гранул, расстояния между ними и их ориентация в пространстве.

Особую важность микроуровень играет с точки зрения микромеханики разрушения и прочности КМ, включая ударную и усталостную прочность, в силу широкого спектра разнообразных механизмов разрушения: разрыв волокна (fiber rupture), микрорастрескивание матрицы / связующего (matrix microcracking), разрушение поверхности сопряжения волокна и матрицы (interfacial debonding), расслоение слоистых композитов (delamination; хотя мы, конечно, понимаем, что слоистые или многослойные КМ это очень удобная упрощенная математическая модель, широко применяемая в инженерной практике) и др. Понятно, что описание на микроуровне отдельных механизмов микромеханики разрушения позволяет нам перейти к исследованию кинетики дефектов – изучению изменений в концентрации и распределении дефектов в КМ во времени, а далее, к изучению накопления и распространения дефектов, этому посвящено важное современное научное направление – механика повреждений как объединение механики деформируемого твердого тела, микромеханики разрушений и вычислительной механики (Damage Mechanics, Continuum Damage Mechanics, Computational Continuum Damage Mechanics). Именно на μ -уровне вводятся такие важные понятия как микротемпературы, микроперемещения, микродеформации и микронапряжения, характеризующие микрополя в микронеоднородных (микрогетерогенных) средах, которые с высокой степенью точности описываются 3D дифференциальными уравнениями в частных производных с быстроосциллирующими коэффициентами (например, модулями упругости, коэффициентами Пуассона, коэффициентами линейного теплового расширения и коэффициентами теплопроводности отдельных компонентов КМ) [8; 9], которые предопределяют сильнопеременные микрополя как непрерывных функций (микротемпературы, микроперемещения, микродеформации, вектор напряжений), так и разрывных функций на криволинейной поверхности сопряжения компонентов (например, разрывные компоненты тензора микронапряжений, формирующие непрерывный вектор напряжений по формуле Коши в случае идеального контакта компонентов КМ). Однако, такие математические формулировки неприменимы на макроуровне – уровне описания поведения изделий (конструкций) в эксплуатационных условиях – не удастся решить ни одной практически значимой задачи. Поэтому возникает актуальная проблема – связать μ -уровень описания микронеоднородного КМ и М-уровень описания изделия, представляющего

собой композитную структуру, фактически, макронеоднородную конструкцию, содержащую микронеоднородный КМ, который будет заменен эквивалентной («эффективной») гомогенизированной средой, то есть, фактически, нужно построить «мост» (μ -M bridge) между μ - и M- уровнями, микро- и макро- уровнями, именно для этого служит m-уровень, мезоуровень;

- **мезоуровень, m-уровень** – уровень, обеспечивающий анализ свойств материалов на промежуточных уровнях между атомистическим и макроуровнем, в разрезе крупнозернистых элементов (coarse-grained elements) для металлических материалов в соответствии с принципами механики сплошной среды и статистической механики; анализ на данном уровне позволяет моделировать многофазные потоки (такие как суспензии и эмульсии), поведение полимеров и мягких материалов, исследовать механику тканей, динамику клеток и др..

Для композиционных материалов мезоуровень рассмотрения играет важную роль как промежуточный уровень, точнее, связующий уровень между μ -уровнем рассмотрения микронеоднородного КМ и M-уровнем рассмотрения изделия как композитной структуры.

Именно на мезоуровне (m-уровне), рассматривая представительные элементы объема (ПЭО, Representative Volume Element, RVE) мы можем корректно на основе фундаментального метода конечных элементов (МКЭ, Finite Element Method, FEA) определить μ -поля – поля микротемператур, микроперемещений, микродеформаций, микронапряжений и путём осреднения по ПЭО, определить макроскопические («эффективные», эквивалентные) физико-механические характеристики и установить эффективные определяющие соотношения в рамках термомеханики микронеоднородной анизотропной среды, необходимые нам для исследования и решения практических задач на макроуровне – уровне рассмотрения изделия. Этот подход в мировой литературе по механике композиционных материалов известен как метод гомогенизации (Homogenization Method, μ -m-M принцип гомогенизации). Отметим, что для периодических КМ или микронеоднородных КМ, моделируемых периодическими КМ, в качестве ПЭО выступает ячейка периодичности (ЯП), на поверхностях которой ставятся либо периодические условия со специальными нагрузками на поверхностях сопряжения компонентов КМ, либо специализированные смешанные граничные условия, обеспечивающие корректное поведение ЯП и всего периодического КМ. Принципиально важно, что во всех случаях необходимо выполнение условия о равенстве энергии деформации микронеоднородного КМ (на μ -уровне) и энергии деформации эффективной гомогенизированной среды (на M-уровне), которое может иметь форму теоремы.

- **макроуровень, M-уровень** – уровень описания поведения изделия или конструкции, как правило, на этом уровне поведение материалов описывается методами механики сплошной среды (Continuum Mechanics) без явного учета его внутренней микроструктуры; для изделий из металлических материалов (металлоконструкций) физико-механические свойства (например, модули упругости, коэффициенты Пуассона, коэффициенты линейного температурного расширения, кривые деформирования и др.), как правило, задаются на основе экспериментальных данных, для композитных структур, содержащих микронеоднородные КМ, физико-механические свойства определяются на основе экспериментов и / или метода гомогенизации и использования гомогенизированной сплошной среды с эффективными определяющими соотношениями (эффективными модулями упругости, коэффициентами Пуассона, коэффициентами линейного температурного расширения, коэффициентами теплопроводности и т. д.); анализ на M-уровне предполагает исследование макроскопических

температур, перемещений, деформаций и напряжений, включая концентрацию напряжений, контактное взаимодействие отдельных частей в изделии (конструкции), решение всех классов задач механики деформируемого твердого тела, включая динамические нелинейные задачи механики, прочности и разрушения, с учетом упругих, упруго-пластических, вязкоупругих и вязкопластических, прочностных и усталостных свойств материалов, задачи теплопередачи и / или тепло-массо-переноса, аэро-, газо- и гидро-динамики, электродинамики, акустики, решение задач о математическом и компьютерном моделировании «внутренних» и «внешних» физико-механических процессов, задач термо-пьезо- электроупругости и многих других задач.

Кроме того, важным инструментом, применяемым в процессе математического и компьютерного моделирования материалов и входящим в область цифрового материаловедения, выступают базы данных о физико-механических свойствах и характеристиках материалов.

На современном этапе развития цифрового материаловедения на основе баз данных о физико-механических свойствах материалов для определенных типов материалов и веществ, например, некоторых металлических сплавов, для которых имеется большое количество данных о взаимосвязи макроскопических свойств с их рецептурным составом, можно сформировать датасет (data set, dataset) – структурированный набор данных, используемый для обучения и тестирования моделей машинного обучения (Machine Learning, ML), для анализа данных, выявления закономерностей и тенденций, а также оценки качества новой модели после ее обучения. Датасет представляет собой таблицу или коллекцию данных, где каждая строка соответствует отдельной записи, а столбцы – различным атрибутам или характеристикам этих записей. В этом случае датасеты служат основой для разработки и улучшения алгоритмов машинного обучения, позволяя ML-моделям выявлять скрытые закономерности и «учиться» на примерах, а впоследствии – применять полученные знания для решения задач, проверять гипотезы или делать те или иные предсказания.

Все эти подходы лежат в основе формирования нового направления – «информатика материалов» в широком смысле этого термина, включая онтологию материалов, методы получения данных о материалах, формирование баз данных и применение технологий искусственного интеллекта в материаловедении. Однако, надо отметить, что многие исходные данные для материалов недоступны для открытого использования. Например, для КМ таких данных в настоящее время слишком мало, чтобы их можно было релевантным образом использовать для адекватного прогнозирования свойств КМ.

Понятно, что свойства, вычисленные на атомарном и молекулярном уровнях, могут быть использованы для построения более точных моделей на следующих уровнях описания материалов – для построения моделей на микроуровне и мезоуровне, а затем и на макроуровне. Такая иерархия математического и компьютерного моделирования позволяет изучать материалы в полном объеме и с учетом свойств структуры, описывая взаимодействие компонентов материала на разных масштабах. С точки зрения науки, конечно, этот подход, называемый Multiscale Analysis (многоуровневый или многомасштабный анализ), представляет серьезный научный вызов уже более четверти века, так как он в основе своей мультидисциплинарный, опирается на научные области знаний, которыми десятилетиями и столетиями занимаются разные группы разных ученых и разных специалистов, что понятно, но еще более важно, что это должен быть – **дуальный многоуровневый трансдисциплинарный подход.**

Поясним, какой смысл мы вкладываем в этот термин – **дуальная многоуровневая трансдисциплинарность**. **Дуальность** предполагает, что неразрывно сосуществуют два начала – с одной стороны, физическое, физико-механическое, физико-химическое, биологическое описание и, с другой стороны, всегда должно быть математическое описание материалов на том или ином уровне (масштабе) рассмотрения и, вообще говоря, с тем или иным уровнем адекватности описания.

Многоуровневый характер описания материалов это, прежде всего, обязательное удержание в поле зрения в исследованиях и в разработках нескольких уровней описания материалов, минимально – два уровня описания, вспомним «мосты» (bridges), но, как правило, – три уровня описания, вспомним μ - m - M принцип, что представляется наиболее эффективным типом многоуровневого описания, а потом широко применяется в механике микронеоднородных анизотропных сред, в механике композиционных материалов и механике композитных структур уже более пятидесяти лет.

Трансдисциплинарность предполагает передачу содержательной информации и знаний из одной области научных знаний, из одних фундаментальных дисциплин в другие, что необходимо для создания эффективных методов решения практических задач. Трансдисциплинарность может быть:

- «горизонтальная» – на одном уровне и в рамках одного масштаба описания, как один из наиболее тонких элементов мультидисциплинарности, когда инвариантная содержательная информация передается из одной научной дисциплины в другую, например, одним из впечатляющих примеров является «температурная аналогия» на основе квазигармонического дифференциального уравнения теплопроводности для гетерогенной анизотропной среды, подробно рассмотренная в книге [10] так и
- «вертикальная», когда содержательная информация передается с одного уровня на другой, например, в соответствии с μ - m - M принципом механики композиционных материалов – с μ -уровня (микроуровня) на M -уровень (макроуровень) с помощью фундаментального метода гомогенизации (Homogenization Method) для представительного элемента объема (ПЭО) композиционного материала на m -уровне (мезоуровне): μ -уровень $\rightarrow$ m -уровень $\rightarrow$ M -уровень. Отметим, что в случае необходимости могут быть введены суб-уровни описания, например, несколько мезоуровней – m -уровней: μ -уровень $\rightarrow$ m_1 -уровень $\rightarrow$ m_2 -уровень $\rightarrow$ M -уровень. Но принципиально более важным в рамках «вертикальной» трансдисциплинарности сформировать «двустороннее движение» – «вверх-вниз», как элемент дуального подхода:
 - «движение вверх по уровням описания» – μ -уровень $\rightarrow$ m -уровень $\rightarrow$ M -уровень – гомогенизация;
 - «движение вниз по уровням описания» – M -уровень $\rightarrow$ m -уровень $\rightarrow$ μ -уровень – гетерогенизация или локализация (Heterogenization, Localization);

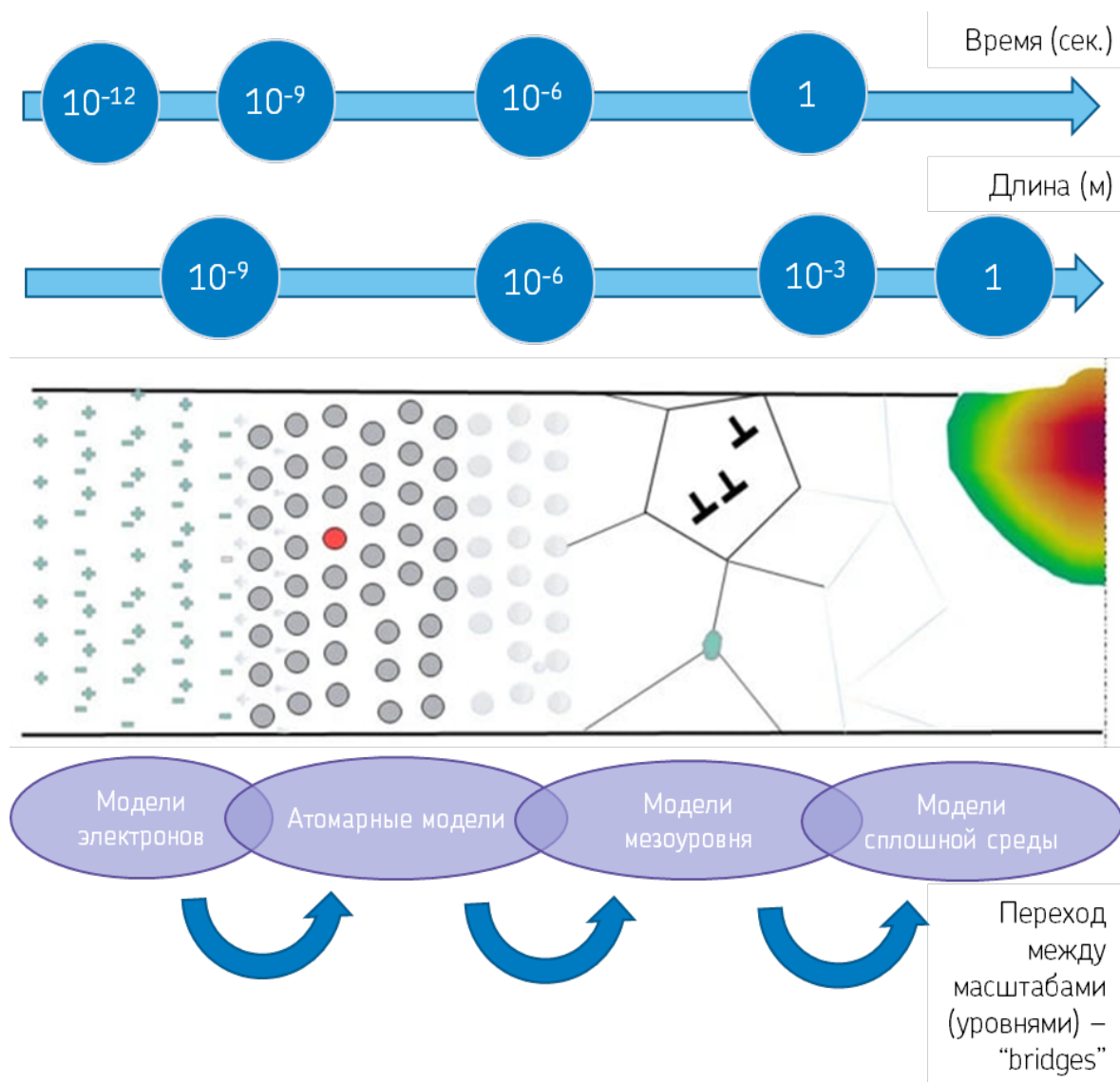
Если метод гомогенизации — это фундаментальный подход для «упаковки» всей содержательной информации на μ -уровне, а именно

- микроструктуры микронеоднородного композиционного материала с существенно различными физико-механическими свойствами компонентов КМ, которые могут быть анизотропными и могут отличаться на порядки (например, в 10-, 100-, 1000 раз),
- полей микротемператур, микроперемещений, микродеформаций, «быстро

осциллирующих» микронапряжений, включая разрывы в компонентах тензора микронапряжений на поверхностях сопряжения компонентов КМ, а также с учетом концентраций микронапряжений между волокнами, гранулами и дисперсными включениями, в интерфейсных слоях и прослойках предполагает передачу содержательной информации и знаний с одного уровня физического и математического описания, со своими формами представления основных законов, онтологией, терминологией, наконец, сложившейся научной культурой, на другой уровень физического и математического описания, причем это должно быть сделано без потери важной содержательной информации и существенных знаний.

Так, описанный выше подход можно проиллюстрировать рисунком 1, сохраняя, для общности, электронный уровень, на котором представлены характерные параметры описания материалов в соответствии с масштабами времени и длины.

Рисунок 1. Иерархия масштабов (уровней) описания материала с позиции характерного времени и характерных размеров



Несмотря на разные масштабы описания, приведенные в [11], с точки зрения используемых подходов и методов, можно выделить две группы методов, которые покрывают всю линейку масштабов, применяемую, как правило, для анализа и практического решения задач о материалах:

- методы атомно-молекулярных структур (они включают в себя точные методы квантовой механики, приближенные методы молекулярной динамики, методы статистической физики и др.), эти методы адекватно применимы для размеров менее 1 нм;
- методы механики сплошной среды, чаще всего – методы механики деформируемого твердого тела (они могут применяться адекватно, начиная с размеров, включающих группы атомов, т.е. примерно, от 1 нм и более).

Переходным уровнем (то, что мы называем «мезоуровнем») является диапазон на границе нанометрового размера, на этой границе раздела атомно-молекулярных указанных и континуальных методов применяются особые методы, как правило, приближенные, сочетающие в себе оба подхода.

Обратимся к прикладным инженерно-техническим задачам, которые чаще всего представляют интерес для решения задач, возникающих в высокотехнологичной промышленности. Как правило, решение инженерных задач подразумевает многоуровневый анализ с учетом разных масштабов описания материалов и изделий. Применительно к композиционным материалам микро- и мезоуровень предполагают исследование взаимодействия отдельных компонентов композита – матрицы, армирующих волокон, включений, наполнителей и т. д., что несколько крупнее масштабов описания традиционного материала; макроуровень предполагает анализ «эффективных» (макроскопических) механических, тепловых и других полей в композитной структуре, включающей гомогенизированную среду, эффективные определяющие соотношения которой определены методом гомогенизации и эквивалентную в энергетическом смысле реальной микронеоднородной среде КМ на микроуровне.

Кроме того, отдельными вопросами исследований и разработки выступают физико-механическое, математическое и компьютерное моделирование изделий из композиционных материалов с учетом внешних нагрузок и внешних воздействий, анализа теплового и напряженно-деформированного состояния, прочности, накопления повреждений, разрушения и других характеристик, а также математическое и компьютерное моделирование технологических процессов производства композиционных материалов, включая ручное и вакуумное формование, формование с подачей смолы (RTM – Resin Transfer Moulding), автоклавное формование, вакуумная инфузия, а также важные физико-механические процессы: пропитка, отверждение, экструзия, намотка и др.

Согласно отчету об экономической эффективности моделирования материалов, подготовленному Goldbeck Consulting Ltd. совместно с MRIGlobal в 2015 году по результатам опроса промышленных компаний при поддержке Европейского совета по моделированию материалов (EMMC) и Международного совета по моделированию материалов (IM2B) [12], моделирование материалов и изделий, изготовленных из этих материалов, включая композиционные материалы, оказывают существенное влияние на развитие промышленности и на экономику [13]. В частности, среди преимуществ цифрового материаловедения указаны следующие эффекты [13]:

- поддержка, сопровождение и совершенствование процессов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в целях решения реальных промышленных задач и разработки инновационных продуктов;

- многомасштабное моделирование, которое обеспечивает получения информации о химических и физико-механических свойствах материалов и изделий на разных уровнях, что повышает эффективность управления информацией и системы поддержки принятия управленческих решений;
- снижение длительности, количества итераций и рисков при разработке материалов и изделий из них, сокращение количества испытаний материалов, в том числе сертификационных испытаний, а также длительности, финансовых и трудовых затрат на организацию и проведение испытаний;
- оценка уровня удовлетворения требованиям и целевым показателям, анализ отклонений от целевых параметров технологического процесса без необходимости проведения разрушающих испытаний;
- эффективное выявление и прогнозирование физико-механических свойств материалов сложной структуры и их поведения в процессе эксплуатации, оптимизация состава и микроструктуры материала для достижения наилучших свойств с учетом процессов эксплуатации, получение новых материалов;
- эффективная организация процесса начиная от синтеза материала и заканчивая проектированием конструкции из материала и др.

Отечественные исследователи, разработчики материалов, представители промышленности и эксперты также отмечают, что цифровое проектирование и моделирование в материаловедении способствует получению сложной геометрии и уникального состава материала, обеспечивающего требуемые свойства, и повышают эффективность процессов разработки [14–16].

В частности, Президент России В.В. Путин привел следующую оценку экспертов – технологии моделирования в совокупности с технологиями искусственного интеллекта могут обеспечить снижение сроков разработки и внедрения новых материалов в промышленности до 2–3 лет [17].

Таким образом, моделирование материалов, в том числе композиционных материалов, широко используется для повышения эффективности исследований и разработок и помогает снизить стоимость продукции за счет поиска альтернативных, более экономичных материалов и процессов, что подтверждает актуальность данного исследования. Цифровое материаловедение обеспечивает высокие результаты в таких отраслях, как атомная энергетика, судостроение и другие отрасли промышленности [18; 19].

Результаты экспертно-аналитического исследования представлены в четырех главах, каждая из которых описывает различные аспекты развития рынка цифрового проектирования и моделирования применительно к материалам и изделиям из них.

В первой главе представлен обзор мирового рынка технологий цифрового проектирования и моделирования материалов, приведены объем и темпы роста рынка, проанализированы тренды и барьеры развития данного направления, а также представлены результаты библиометрического и патентного анализа по рассматриваемому направлению.

Во второй главе книги приведен обзор основных игроков рынка, описаны продукты компаний, ключевые сделки по слиянию и поглощению, рассмотрены примеры коопераций и инвестиций на рынке, а также реализуемые новые проекты. Также вторая глава содержит обзор компаний НТИ, ведущих деятельность на рынке, описание компаний и их продуктов, объем выручки и другие

показатели рынка.

Третья глава содержит обзор документов нормативно-правового и нормативно-технического регулирования, включая государственные меры поддержки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, стандарты и нормативно-технические документы в области цифрового проектирования и моделирования, новых материалов. Обзор включает результаты анализа нормативно-правовой деятельности в таких странах как Россия, США, Китай, странах Европейского союза и др.

Четвертая глава включает результаты анализа научных разработок и направлений развития в рассматриваемой области. В главе приведен обзор цифровых технологий моделирования изделий из композиционных материалов на основе инструментов разработки и применения цифровых двойников композиционных материалов.

Таким образом, экспертно-аналитический доклад «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)» отражает актуальные рыночные, нормативно-правовые и научно-технологические особенности развития направления моделирования материалов и изделий из них, включая композиционные материалы, что является перспективным направлением развития цифрового проектирования и моделирования на стыке с материаловедением и формирует приоритеты развития промышленных компаний.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В ходе анализа рынка технологий цифрового проектирования и моделирования материалов рассмотрен рынок программного обеспечения моделирования и информатики материалов (Materials Modelling and Informatics Software). В соответствии с подходом, представленным в отчете Goldbeck Consulting Ltd. [20; 21], а также на основе результатов анализа ключевых научных направлений в области инжиниринга материалов и моделирования свойств определены ключевые сегменты – направления развития цифрового материаловедения, которые обеспечивают проведение многомасштабного (многоуровневого) анализа как самих материалов с заданными свойствами, так и изделий из них.

Так, рынок программного обеспечения моделирования и информатики материалов делится на два крупных сегмента – *сегмент моделирования*, то есть цифрового проектирования, математического и компьютерного моделирования, которое включает все программные системы и решения, обеспечивающие непосредственно процесс проектирования и всестороннего моделирования материалов и изделий из них, а также процессов изготовления; и *сегмент информатики материалов*, который подразумевает обработку, анализ и хранение данных, обучение моделей машинного обучения с целью формирования перечня свойств материалов и т. д.

Моделирование, в свою очередь, имеет два ключевых направления – математическое и компьютерное моделирование, основанное на законах физики, то есть на основе физических уравнений в разрезе масштабов электронов, атомов, молекул и, что более важно для практических применений

- микронеоднородных материалов, описание которых проводят на μ -уровне (микроуровне), например, поликристаллических металлов, состоящих из зерен (маленьких кристаллов) – эти зерна разделены границами зерен, которые представляют собой переходные области между зонами с различными ориентациями осей в кристаллических зернах, которые могут быть ориентированы случайно, но могут иметь предпочтительную ориентацию, называемую текстурой; эта ориентация, а также размер и форма зерен, влияют на физико-механические свойства поликристаллических материалов: теплопроводность, упругость, пластичность, вязкость, прочность и т. д.;
- микронеоднородных композиционных материалов, о специфических особенностях описания которых достаточно подробно написано во Введении, на m -уровне (мезоуровне), на котором определяются эффективные физико-механические свойства, используемые для описания изделий и объектов с помощью теорий и методов механики сплошной среды (Continuum Mechanics), точнее, механики деформируемого твердого тела – это описание проводят на M -уровне (макроуровне);
- моделирование, основанное на данных (Data-driven Materials Modeling), в первую очередь, на основе эмпирических соотношений, полученных из наборов и баз данных или на основе данных (Datasets) с применением моделей машинного обучения (Machine Learning) и технологий искусственного интеллекта.

Информатика материалов (Materials Informatics) подразумевает применение баз данных, моделей для машинного обучения и технологий ИИ в процессе инжиниринга в целях разработки, отбора и применения материалов, что предполагает создание, хранение, поиск и обмен данными и информацией.

Как правило, пакеты программ информатики материалов включают применение методов информатики для решения химических задач (хемоинформатики, химической информатики, молекулярной информатики), системы управления данными о материалах, а также область онтологий материалов. Сюда также следует отнести специализированное программное обеспечение на основе машинного обучения и технологий искусственного интеллекта для материалов, что не относится к «традиционным» методам машинного обучения, часто включенным в пакеты программ для моделирования материалов. Информатика материалов часто характеризуется как область, использующая принципы науки о данных, машинное обучение и знания о материалах и химических веществах для решения задач материаловедения [22].

Важно отметить, что микроуровень описания материала является фундаментальным уровнем, поскольку состав материала, описание атомов и их распределение, структура слоев материалов оказывают влияние на физико-механические свойства материала на последующих уровнях, и информация о свойствах материала используется на последующих уровнях моделирования [23]. Именно восходящий подход к моделированию материалов в соответствии с уровнями масштабов позволяет всеобъемлюще и комплексно описать материал и его поведение в изделиях и объектах при внешних нагрузках и внешних воздействиях.

Рисунок 2. Одна из возможных схем сегментации рынка технологий цифрового проектирования и моделирования материалов



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Goldbeck Consulting Ltd. [20; 21], 2025

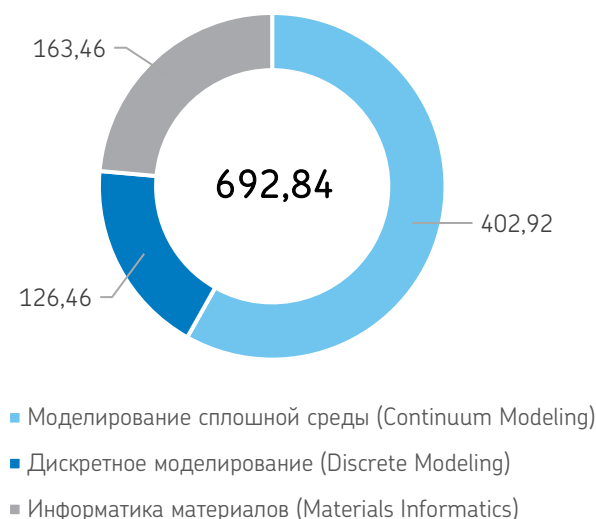
Таким образом, основные сегменты рассматриваемого рынка в соответствии с вариантом Goldbeck Consulting Ltd. [20; 21] соответствуют основным технологиям направления в части цифрового проектирования и моделирования (компьютерное проектирование, компьютерный инжиниринг и др., что обеспечивает реализацию математического и компьютерного моделирования) с фокусировкой на новые материалы, которые сегментируются в соответствии с типом материала и характеристиками составных элементов [7].

Стоит отметить, что на схеме, изображенной на рисунке 2, отображается смешение двух важных смыслов, в которых используются понятия «микро-уровень» и «мезо-уровень».

Если эти термины применяются к материалам вообще, то мезо-уровень следует понимать как переходный уровень от атомно-молекулярных методов к методам механики сплошной среды. Если эти термины применяются к композиционным материалам, то и микро-уровни, и мезо-уровни для физико-механических полей и характеристик рассматриваются и исследуются исключительно методами механики сплошной среды и вычислительной механики.

Необходимо отметить, что в силу одновременного динамичного развития нескольких научных направлений, использующих разные уровни описания материалов, зачастую используются термины, которые применяются в двух и более смыслах (фактически, мы имеем дело с ситуацией, когда «термины перегружены смыслами»), что предъявляет особые требования к четкому определению используемых терминов во всех исследованиях, как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях.

Рисунок 3. Объем рынка программного обеспечения моделирования и информатики материалов, 2022, млн долл.



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Goldbeck Consulting Ltd. [20; 21], 2025

Согласно оценке Goldbeck Consulting Ltd., в 2022 году **объем** мирового рынка программного обеспечения математического и компьютерного моделирования, включая дискретное моделирование и информатику материалов составил 692,84 млн долл.¹ [20; 21], из них:

- 402,92 млн долл. составляет рынок математического и компьютерного моделирования на основе теорий и методов механики сплошной среды (Continuum Mechanics), точнее, механики деформируемого твердого тела, а также сегмент рынка автоматизированных технологий моделирования и проектирования производства полупроводников (TCAD-процесс, Technology Computer-Aided Design, TCAD) и работу полупроводниковых устройств (TCAD-устройств) в размере 21,76 млн долл.,

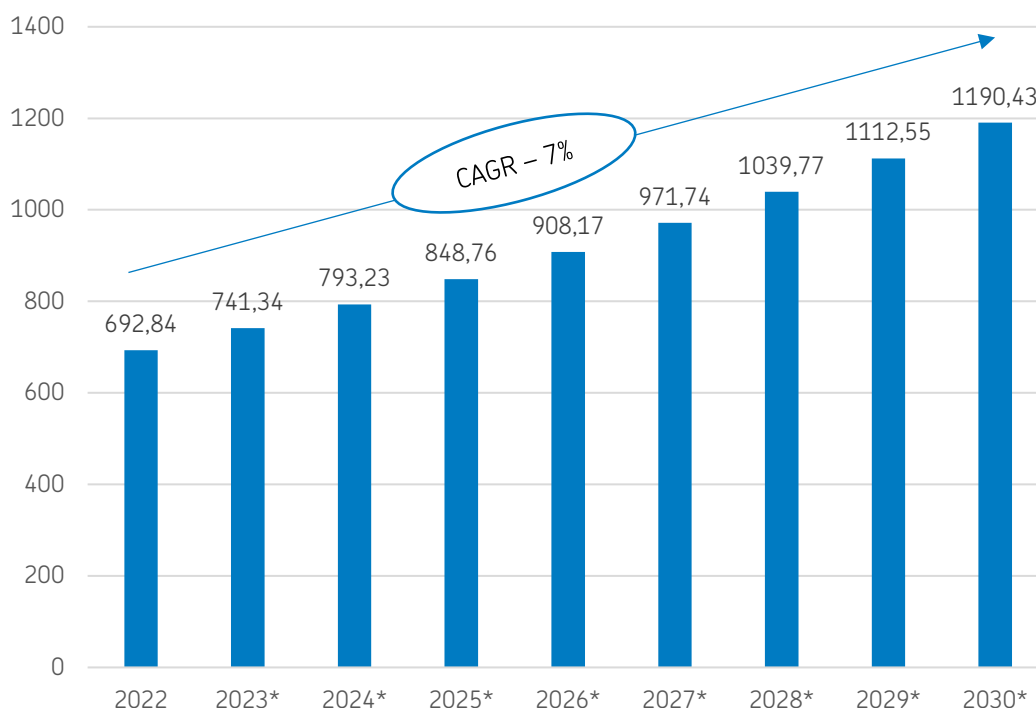
¹ Здесь и далее расчет объемов рынка приведен в долларах США по среднегодовому курсу:
1 долл. США = 0,9513 евро за 2022 год.

- 126,46 млн долл. относится к рынку дискретного моделирования материалов, использующему атомно-молекулярный уровень описания, включая рынок программного обеспечения на основе квантовых вычислений в размере 14,4 млн долл.,
- 163,46 млн долл. занимает рынок информатики материалов, понимаемой в широком смысле этого термина.

Таким образом, объем мирового рынка математического и компьютерного моделирования материалов (рынок моделирования на основе теорий и методов механики деформируемого твердого тела) и рынок информатики материалов составил 566,38 млн долл. в 2022 году. В целом мировой рынок программного обеспечения математического и компьютерного моделирования и информатики материалов составляет около 4,5%–6,6% от общего объема рынка CAE-систем.

Темпы ежегодного роста (CAGR) мирового рынка программного обеспечения математического и компьютерного моделирования и информатики материалов оцениваются в размере 7% ежегодно с 2019 по 2022 годы, что также подтверждается среднегодовым темпом роста рынка CAD-, CAM-, CAE-систем и позволяет сделать прогнозную оценку роста анализируемого рынка в последующий период. Согласно прогнозу, объем рынка программного обеспечения математического и компьютерного моделирования и информатики материалов к 2030 году составит 1190,43 млн долл.

Рисунок 4. Темпы роста рынка программного обеспечения моделирования и информатики материалов, 2022–2030, млн долл.



Источник: ИЦ «Технет СПбПУ по материалам Goldbeck Consulting Ltd. [20; 21], 2025

Незначительные финансовые показатели рынка обусловлены его наукоёмкостью и новизной. Он стал формироваться последние 10–15 лет благодаря развитию цифровых технологий математического и компьютерного моделирования, высокопроизводительных вычислений, больших данных, искусственного интеллекта и машинного обучения, что, в целом, приводит к формированию нового научного направления – цифрового материаловедения.

В целом рынок неоднородный, увеличение количества компаний-стартапов и значительные темпы роста наблюдаются в двух из трех сегментов при том, что они занимают менее половины рынка цифрового моделирования материалов: информатика материалов $\approx 18\%$ CAGR, дискретное моделирование $\approx 16\%$ CAGR. Сегменты рынка развиваются весьма динамично по мере того, как научно-технические достижения и разработки, в том числе с применением искусственного интеллекта и машинного обучения, выходят на рынок.

В сегменте математического и компьютерного моделирования материала как сплошной среды на основе теорий и методов механики деформируемого твердого тела преобладают компании-лидеры рынка компьютерного моделирования и CAE-систем (Siemens Digital Industries Software, Ansys, Hexagon, Altair и др.), которые разрабатывают собственные решения или интегрируют перспективные решения малых компаний в уже существующие программные продукты. Поэтому для данного сегмента характерны невысокие темпы роста, сопоставимые с темпами роста рынка CAE-решений. Учитывая эти факторы, можно ожидать, что зарождающийся рынок цифрового моделирования материалов в части моделирования сплошной среды будет развиваться не самостоятельно, а в рамках рынка цифрового моделирования, продукты и услуги которого востребованы в промышленности. Вероятно, что сегменты дискретного моделирования и информатики материалов, находящиеся в **стадии зарождения**, продолжат расти, а разработанные в рамках данных сегментов решения будут активно применяться не только в промышленности, но и в медицине, биологии и химии.

Таким образом по результатам анализа не представляется возможным дать однозначную оценку стадии жизненного цикла рынка (industry life-cycle model), опираясь на классическую модель, предложенную институтом CFA (Chartered Financial Analyst Institute), на основе анализа данных об объеме и темпах роста рынка, с учетом показателей деятельности компаний-лидеров в рассматриваемой области, результатов патентного и библиометрического анализа [7; 24; 25], так как сегменты рынка имеют различные данные, анализируемые в рамках модели, и их усреднение не целесообразно и может исказить действительность.

В рамках анализа развития рынка технологий цифрового проектирования и моделирования материалов были выделены следующие **тренды**:

Машинное обучение и искусственный интеллект в материаловедении и моделировании. С развитием технологий машинного обучения и искусственного интеллекта появляются новые возможности для материаловедения. С помощью алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта можно разрабатывать новые материалы с требуемыми свойствами, а также эффективно предсказывать свойства существующих материалов, такие как прочность, теплопроводность, коррозионная стойкость и другие, которые важно учитывать как при цифровом проектировании и моделировании, так и в процессе дальнейшей эксплуатации материала [26]. Такой подход позволяет сбалансировать физико-механические свойства материалов, оптимизировать стоимость и структуру материала, а также формировать обоснованные и эффективные решения в области материаловедения [27; 28].

Помимо сегмента информатики материалов, алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта также применяются непосредственно при моделировании материалов.

Модели и методы машинного обучения и искусственного интеллекта позволяют инженерам-материаловедам вносить изменения в конструкцию (хотя, конечно, этим профессионально занимаются системные инженеры, инженеры-конструкторы, инженеры-расчетчики, инженеры-технологии), а также генерировать данные, которые затем могут заполнить пробелы в знаниях о новых свойствах материалов, об их реакциях на различные условия и внешние воздействия, позволяют оценить неопределенности в характеристиках материалов, которые необходимы для дальнейшего моделирования материалов, включая композиционные материалы.

Российские эксперты также отмечают эффективность использования искусственного интеллекта для генерации данных о материалах [29]. Таким образом, интеграция алгоритмов искусственного интеллекта в процессы разработки композиционных материалов обещает прогресс в материаловедении и инжиниринге, что должно привести к созданию материалов, которые могут быть применены в различных отраслях промышленности [30].

Квантовые вычисления для вычислительной химии. Квантовые вычисления – это область вычислений, которая использует принципы квантовой механики для обработки информации. В отличие от классических компьютеров, которые оперируют битами (каждый из которых может быть равен либо 0, либо 1), квантовые компьютеры используют кванты информации (квантовые биты или кубиты) [31]. Интеграция квантовых вычислений с материаловедением может ускорить открытие новых материалов с уникальными свойствами. Квантовая механика, описывающая поведение частиц на атомном и субатомном уровнях, дает необходимое для материаловедения базисное описание материала, используемое для изучения его свойств, а квантовые компьютеры могут моделировать поведение материалов на уровне атомов, позволяя исследователям предсказывать свойства материалов и оптимизировать их работу [32; 33].

Нанотехнологии. Помимо этого, отдельное внимание уделяется нанотехнологиям. Появление наноинженерии позволило инженерам улучшить внутреннюю структуру материалов [34], например в части предотвращения образования трещин в многослойных композитах [35], повышения прочности [36] и др. Нанотехнологии позволили значительно улучшить механические, электрические и оптические свойства материалов. Наноматериалы, включая нановолокна, нанотрубки и квантовые точки, обладают улучшенной прочностью, лёгкостью и высокой химической активностью. Эти свойства особо важны для таких сфер как электроника, медицина и энергетика, где они способствуют улучшению функциональности и эффективности конструкций [28]. Благодаря интеграции вычислительной химии и механики сплошной среды эти модели позволяют разработать взаимосвязь между структурой и свойствами наноструктурных материалов, что приводит к более точному моделированию свойств материалов.

Сочетание моделирования на основе данных и моделирования на основе законов физики. Как уже было отмечено ранее, моделирование может быть поделено на два основных направления: математическое и компьютерное моделирование, основанное на законах физики, и моделирование, основанное на данных. Фундаментальные модели, основанные на законах физики, требуют широкого спектра данных, для получения которых экспериментальным путем требуется значительное количество времени и средств. Вместе с тем проведение математического и компьютерного моделирования требует зачастую значительных вычислительных ресурсов, поэтому многие специалисты в настоящее время возлагают определенные надежды на успехи в применении моделирования на основе данных. Конечно, время покажет, насколько эти надежды оправдаются.

Математическое и компьютерное моделирование на основе законов физики не отменяет проведение экспериментов и физических испытаний материалов, ведь именно данный процесс позволяет получить обоснованные результаты испытаний и свойства материалов, что служит основой для моделирования, валидации (Validation) математических и компьютерных моделей материалов, а также обоснованным повышением уровня адекватности моделей материалов.

Моделирование на основе данных, которое, как правило, предполагает генерацию и последующий анализ больших объемов информации, выполняется быстрее и эффективнее относительно затрачиваемых вычислительных ресурсов, но наборы данных для машинного обучения содержат погрешности и зачастую носят необъективный характер, что может существенно повлиять на результаты моделирования [11]. В связи с этим возникла тенденция к разработке новых программных систем, объединяющих сильные стороны моделирования на основе данных и на основе законов физики, расширяющих функциональные возможности инструментов моделирования и обеспечивающих устранение пробелов в данных за счет интеграции источников данных [37]. Такие гибридные решения должны обеспечивать баланс между точностью и требуемой вычислительной мощностью.

Потребность в единой платформе с доступом к интегрированным решениям от разных разработчиков. Как показывает практика, предприятиям приходится взаимодействовать с множеством потенциальных поставщиков, решения которых не всегда интегрированы между собой по ряду причин, что является одним из функциональных барьеров в данной области. Именно поэтому возникает необходимость в разработке и внедрении единой платформы, которая будет предоставлять доступ к решениям от разных разработчиков и облегчит передачу данных между системами. Это упростит процесс моделирования материалов, а также предоставит разработчикам всех типов программного обеспечения возможности по расширению своих позиций на рынке и повышению эффективности предлагаемых инструментов в области цифрового материаловедения.

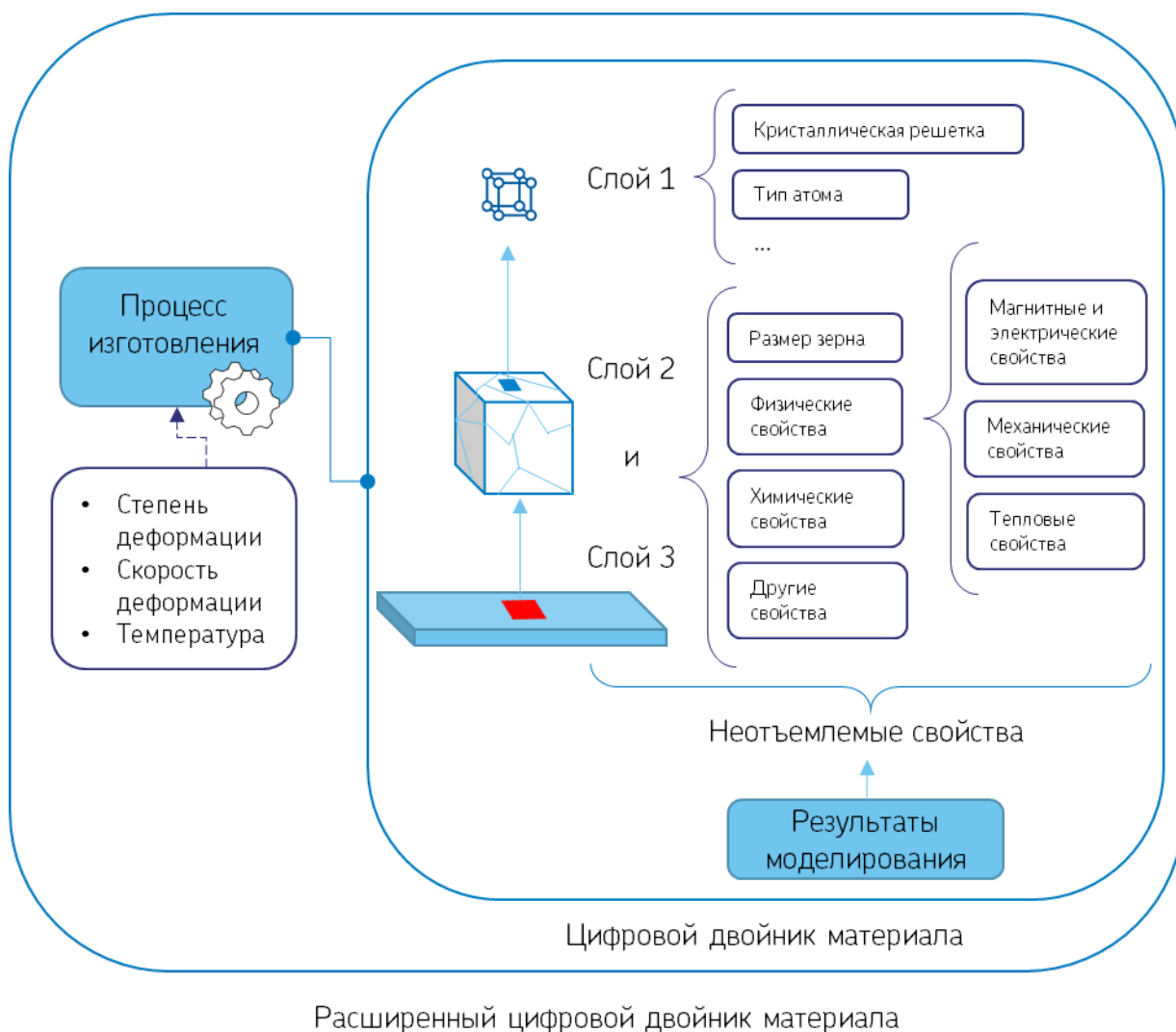
Вместе с тем есть опасения, что в обозримом будущем возможно создать единую платформу. И в первую очередь, из-за того, что все данные являются собственностью разработчиков материалов, и они, как правило, выступают категорически против такого объединения. Кроме того, большинство передовых материалов, их физико-механических характеристик, зависимостей свойств материалов от температуры и / или скоростного деформирования, не представлено в открытом доступе и открытых публикациях, так как являются чаще всего секретами фирмы, формирующими конкурентоспособность материалов и изделий. Наконец, политика безопасности данных о материалах не будет способствовать реализации создания «единой платформы». Поэтому в ближайшее время наиболее реалистичными представляются корпоративные платформы, распространяемые на коммерческой основе, или частично распространяемые или закрытые (не распространяемые).

Интеграция специализированных систем по моделированию материалов в CAE. Согласно отчету Goldbeck Consulting Ltd. [20; 21], большая часть рынка математического и компьютерного моделирования материалов будет включена в рынок систем компьютерного инжиниринга (CAE), что является естественным процессом, тесно связанным с двумя описанными выше трендами в части интеграции программных систем на платформу, а также сочетания моделирования на основе данных и моделирования на основе законов физики.

Ожидается усиление позиции CAE-систем и масштабирование их функциональных задач за счет интеграции с другими специализированными системами в форме подсистем или модулей [38].

Разработка и применение цифровых двойников материалов. Технология цифровых двойников [5; 39], развиваемая для высокотехнологичных изделий, безусловно, применима и для композиционных материалов, часто представляемых как «конструкция в конструкции», учитывая микронеоднородную структуру КМ на μ -уровне и рассмотрение поведения изделия на М-уровне. Именно этот многоуровневый подход описания КМ на трех уровнях (μ -m-M принцип) позволяет корректно воспроизводить физико-механические свойства компонентов КМ всех типов – гранулированных, волокнистых, волокнисто-слоистых, слоистых, текстильных и гибридных КМ. Этот фундаментальный многоуровневый подход способствует проведению всех необходимых испытаний КМ в полном объеме и формированию ключевых направлений исследований и разработок с целью последующего улучшения физико-механических свойств КМ, а также повышения экономической эффективности применения композиционных материалов [40]. Композиционные материалы являются сложными многомасштабными и мультифизическими системами, поведение которых в процессе производства и эксплуатации зависит от явлений, происходящих в масштабах от μ -уровня до макроскопического М-уровня [41].

Рисунок 5. Цифровой двойник материала в соответствии с подходом авторов из Рейнско-Вестфальского технического университета Ахен



Так, цифровой двойник материала в соответствии с подходом авторов из Рейнско-Вестфальского технического университета Ахена (Германия) предполагает учет физико-механических свойств материала на микроуровне (слой 1), мезоуровне (слой 2) и макроуровне (слой 3), дополненных результатами математического и компьютерного моделирования поведения материала при внешних нагрузках [23] и внешних воздействиях. Кроме того, авторы выделяют концепцию расширенного цифрового двойника материала, в котором учтены технологические процессы изготовления композиционного материала со всеми его микроструктурными, многоуровневыми и технологическими особенностями. Однако, нужно понимать, что рисунок 5 это лишь набросок «цифрового двойника», который многого не учитывает. Так, на рисунке 5 не указаны математические и компьютерные модели на микро-, мезо- и макро-уровне, сведения о технологиях изготовления материалов, для которых тоже должны быть указаны математические и компьютерные модели технологических процессов.

Разработка материала с применением технологии цифровых двойников рассматривается исследователями как эффективный подход к расширению возможностей анализа свойств материалов на разных уровнях масштабов [11; 23; 41–43]. Разработка цифровых моделей композиционных материалов позволит компаниям воспроизводить многомерную структуру материала для анализа его ключевых свойств на стадии разработки, отслеживать и контролировать количество и качество материала на стадии производства, оценивать эффективность применения в новых конструкциях и новых отраслях на стадии эксплуатации [41]. Подробнее о применении технологии цифровых двойников при разработке композиционных материалов см. в Главе 4.

Импортозамещение программных систем и композиционных материалов. В России реализуется масштабная деятельность по импортозамещению различных изделий, систем и материалов, что стало особенно актуальным в связи с экономическими санкциями и геополитическими изменениями.

Импортозамещение также реализуется в части создания специализированных отечественных систем для разработки, проектирования и моделирования изделий из композиционных материалов. Как отмечают эксперты, на отечественных предприятиях по состоянию на начало 2024 года доминирующим программным обеспечением для проектирования конструкций и технологической подготовки производства изделий из композиционных материалов выступали решения от компании-разработчика Siemens Digital Industries Software, Dassault Systèmes, Ansys, Hexagon и ряд других систем [44]. Аналогов специализированных систем и модулей для разработки изделий из композиционных материалов у российских разработчиков инженерного программного обеспечения по мнению авторитетного PLM-специализированного ресурса isicad.ru в 2024 году не было [44].

Однако, в настоящее время ведется системная работа по данному направлению, например, была разработана система автоматизированного проектирования с использованием композитов, позволяющая моделировать процесс укладки, учитывать производственные особенности композиционных материалов и получать точные контуры плоских разверток [44]. На текущий момент ведется доработка платформы и расширение функциональных возможностей.

Геополитические факторы являются важной причиной трансформации рынка цифрового проектирования и моделирования и повлияли на уход с отечественного рынка ряда зарубежных разработчиков инженерного программного обеспечения [45].

В целях импортозамещения зарубежных решений в Российской Федерации реализуется дорожная карта реализации высокотехнологичного направления «Новое индустриальное программное обеспечение». Инфраструктурный центр «Технет» включен в перечень экспертных организаций по сопровождению направления «Новое индустриальное программное обеспечение» согласно протоколу № 1 заседания президиума Правительственной комиссии по модернизации экономики и инновационному развитию России от 30 марта 2023 года [46].

В рамках реализации дорожной карты регулярно проводится оценка состояния рынка отечественных и зарубежных программных продуктов, определяются реальные потребности предприятий в разрезе функциональных возможностей инженерного программного обеспечения по его ключевым классам: CAD-, CAE-, CAM- и PLM-систем.

Данная инициатива содействует реализации государственной цели по достижению индекса 80% технологической независимости в области промышленного программного обеспечения к 2030 году.

В рамках стратегической задачи по импортозамещению зарубежных программных продуктов заключен ряд соглашений между разработчиками отечественных программных систем и представителями высокотехнологичной промышленности. Так, по направлению двигателестроения заключено соглашение между АО «ОДК-Авиадвигатель» (входит в АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК»), Госкорпорация «Ростех») и АО «АСКОН», отечественным разработчиком инженерного программного обеспечения, в целях совместной реализации особо значимого проекта (ОЗП) при поддержке Российского фонда развития информационных технологий (РФРИТ) [47–52]. ОЗП направлен на импортозамещение программных продуктов Siemens NX, Teamcenter и FiberSIM на отечественные решения класса CAD и PLM, а также программное обеспечение для разработки изделий из полимерных композиционных материалов. Как отмечают в АО «ОДК», отечественные аналоги для решения задач, связанных с применением композиционных материалов, в отрасли двигателестроения отсутствуют [53].

Еще один особо значимый проект в части импортозамещения инженерного программного обеспечения реализуется ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК», Госкорпорация «Ростех») совместно с ЗАО «Топ Системы», компанией-разработчиком программных систем, и направлен на внедрение единой информационной среды ПАО «ОАК» для управления процессами разработки изделий авиационной техники на основе подходов и методов системного инжиниринга и управления жизненным циклом продукции [54]. Как отмечают в ПАО «ОАК», одна из планируемых к решению задач связана с разработкой модуля для проектирования изделий авиационной техники из композиционных материалов [55].

Помимо этого, ограничен импорт сырья, материалов и композитов, вследствие чего Правительство Российской Федерации утвердило комплексную научно-техническую программу «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства», ориентированную на разработку новых композиционных материалов и их компонентов [56].

Использование экологически устойчивых и безопасных материалов. В процессе производства и использования новых материалов образуется значительное количество отходов, потенциально пригодных для вторичного применения. Это способствует тому, что производители начинают все чаще учитывать экологическую безопасность при разработке и выборе материалов и продукции,

оценивать их с точки зрения устойчивости жизненного цикла и отдавать предпочтение экологически безопасным материалам, в том числе подходящим для последующей переработки [57; 58]. Например, новые компании разрабатывают композиционные материалы из биоматериалов, которые содержат высокопрочные натуральные волокна или переработанные материалы [59]. Технологии цифрового проектирования и моделирования также будут адаптироваться под альтернативные экологически устойчивые материалы и учитывать особенности того, как материалы будут интегрированы в изделие и как они могут быть утилизированы после окончания срока службы [60].

Выявленные направления развития и драйверы рынка цифрового проектирования и моделирования композиционных материалов сталкиваются с рядом значительных **барьеров**, которые препятствуют устойчивому внедрению данных технологий в промышленность.

В частности, *нехватка достоверных данных о свойствах материалов и существующие пробелы в этой области* не позволяют широко использовать данные о материалах на этапах проектирования и моделирования конструкций [29]. При применении таких общепринятых и широкоприменяемых методов, как конечно-элементный анализ (FEA) и вычислительная гидродинамика (CFD), могут возникать трудности с определением физико-механических характеристик математических и компьютерных моделей материалов, особенно, композиционных материалов. Кроме того, *наличие различных форматов данных* затрудняет их обработку и хранение [11].

Также барьером для развития технологий цифрового проектирования и моделирования в материаловедении является *высокая стоимость и сложность их внедрения* [11; 29]. Зачастую с этим сталкиваются малые и средние предприятия, которые в редких случаях занимаются целенаправленной исследовательской деятельностью и, как правило, не имеют доступа к высокопроизводительным вычислительным системам. Создание таких НПС-систем или ЦОД'ов с нуля является дорогостоящим процессом, который включает в себя создание арсенала специализированного ПО, в первую очередь, CAD-CAE-CFD-CAO-MBD-DEM-систем, специализированных инструментов, трудоемкое управление данными, для которых необходимы PLM-технологии, PDM- и SPDM-системы, и специализированная подготовка инженеров и сотрудников.

Также ограниченное применение технологий цифрового проектирования и моделирования материалов обусловлено *отсутствием или недостаточной проработкой стандартов и методик*, что может приводить к погрешности при выборе инструмента и произвольному выбору модели, которая может не подходить под решаемую задачу [11]. Разработка стандартов в данной области может способствовать повышению востребованности данных технологий среди промышленных компаний.

Помимо этого, барьером является *отсутствие коммуникации между участниками*, вовлеченными в процесс разработки и применения данных технологий [11]. Такими участниками являются инженеры, разработчики программного обеспечения и конечные пользователи, которые работают в качестве исследователей или разработчиков в академических кругах, организациях и университетах, занимающихся исследованиями в области технологий, или в промышленности, где ведутся исследования и разработки в части внедрения композиционных материалов. Данные группы участников могут по-разному интерпретировать методы и подходы к технологиям из-за различий в опыте, мотивах и терминологии, при этом взаимодействие между участниками может происходить нерегулярно или неэффективно, что может привести к потенциально противоположным и разнородным результатам исследований.

Несмотря на наличие различных инструментов для математического и компьютерного моделирования, исследования и разработки в области материалов всё ещё требуют *более совершенных и эффективных решений* для обоснованного выбора множества потенциальных составов новых материалов с требуемыми свойствами, что поможет сократить время и расходы на производство отдельных материалов. Дальнейшее развитие вычислительных мощностей, создание новых алгоритмов генерации данных о свойствах материалов и улучшение инфраструктуры для хранения данных обещают значительный прогресс в поиске новых материалов и ускорении их выхода на рынок [61].

Импортозамещение программных систем и материалов для разработки и производства композитов в России одновременно стало и драйвером, и сложным барьером для развития отрасли. Многие отечественные компании сталкиваются с трудностями, связанными с ограниченным доступом к инновационным материалам и сырью, а также передовым зарубежным программным продуктам.

Сложности вызывают как нехватка инструментов для математического и компьютерного моделирования материалов, ограниченность функциональных возможностей, так и проблемы с интеграцией систем и результатов на отдельных этапах моделирования. Использование российского программного обеспечения может тормозить деятельность предприятий и требовать значительных затрат в части перехода на новую систему [62]. В настоящее время наблюдается нехватка систем цифрового проектирования и моделирования для композиционных материалов, которые позволяли бы полностью описать технологию производства изделий из композиционных материалов [63].

Таким образом, импортозамещение является особым явлением на рынке цифрового проектирования и моделирования композиционных материалов. Оно является как важным трендом, стимулирующим развитие отечественных технологий и снижающим зависимость от внешних поставок, так и барьером, создающим сложности для компаний, вынужденных адаптироваться к новым решениям, функциональных возможностей которых может не хватать.

Также барьером является *высокая трудоемкость и стоимость подготовки оборудования* для производства композиционных материалов [44]. Разработка специализированного программного обеспечения и базы материалов, которую проводят организации в различных странах, позволит существенно сократить время между процессами создания и производства изделий из данных материалов [64–67].

Компании также сталкиваются со *сложностью определения свойств материала и описания изделия из композиционных материалов с большим количеством параметров* [44; 68–70]. Теплофизические, термоупругие, прочностные характеристики микронеоднородных композиционных материалов, как правило, различны на макроуровне в разных направлениях – являются макроскопически анизотропными физико-механическими характеристиками, могут быть различными при растяжении и сжатии – разномодульными материалами, а их прочность в самом общем виде описывается тензорно-полиномиальными критериями прочности / разрушения, которые выступают в качестве индикатора для перехода на микроуровень, где могут быть реализованы различные механизмы разрушения КМ, которые были представлены во Введении. Всё это, в комплексе, представляет собой сложную и уникальную задачу для математического и компьютерного моделирования, в первую очередь, для разработки верифицированных и валидированных физико-механических, математических и компьютерных моделей, обладающих высоким уровнем адекватности описания поведения

микронеоднородных КМ. В случае с со слоистыми композитами каждая конструкция, как правило, имеет свою собственную схему укладки слоев (stacking sequence), содержащих армирующие волокна с той или иной объемной концентрацией, что предполагает определение всех необходимых физико-механических характеристик или с помощью метода гомогенизации, или с помощью экспериментов для отдельного слоя. Кроме того, возникающие «остаточные» деформации в процессе и после процесса отверждения связующего могут являться серьезной проблемой при производстве из композиционных материалов, так как они влияют на точность параметров и структурные характеристики изделий, что может потребовать повторного математического и компьютерного моделирования, разработки моделей с более высоким уровнем адекватности реальным технологическим процессам, и корректировки параметров производственного цикла [71].

В области цифрового проектирования и моделирования материалов также существует ряд **рисков**, которые могут существенно повлиять на точность и надёжность результатов. Риски для моделирования материалов выделены как для сегмента новых материалов, так и для сегмента технологий моделирования.

Один из рисков связан с *качеством и точностью данных о физико-механических свойствах материалов и с уровнем адекватности математических и компьютерных моделей*. Моделирование материалов зависит от качества больших массивов данных, количества и точности итераций по проведению испытаний и полученных результатов, позволяющих предсказать с высокой степенью точности поведение материалов. Сложное строение материалов, особенно микронеоднородных композиционных материалов, приводит к появлению сложных предсказательных моделей, в которых необходимо учитывать специфические особенности микро- и макроструктуры конструкции (композитных структур).

Опыт выполнения работ в области механики композиционных материалов и композитных структур на протяжении 40 лет позволяет сделать обоснованное утверждение: конечно, методы многомасштабного (многоуровневого) математического и компьютерного моделирования поведения микронеоднородных композиционных материалов и композитных структур (изделий) на макроуровне являются одной из вершин современной науки и передовых цифровых технологий, особенно, с точки зрения механизмов накопления повреждений и эволюции разрушений на микроуровне, учитывая все многообразие специфических особенностей поведения и разрушения. Понятно, что все основные достижения в будущем, в частности, инновационные композиционные материалы и композитные структуры, будут связаны с системными экспериментальными исследованиями композиционных материалов, которые создают фундаментальную основу для разработки верифицированных и валидированных математических и компьютерных моделей, обладающих высоким уровнем адекватности описания микроструктуры КМ, технологических процессов их изготовления и поведения композитных структур на макроуровне в эксплуатационных условиях (высокие и низкие температуры, интенсивные нестационарные механические, газодинамические, тепловые и электромагнитные нагрузки, высокоскоростное деформирование, статические, вибрационные, динамические, ударные и циклические воздействия и др.) с учетом накопления повреждений, множественного контактного взаимодействия и эволюции разрушений на микроуровне.

Конечно, имеющиеся неточности и неопределенности в математических и компьютерных моделях, присущие сложным задачам, на практике приводят к необходимости проведения натурных испытаний материалов и определения запасов прочности [72].

Если данные, используемые для моделирования, недостаточно точные, неполные или необъективные, это может привести к неверным оценкам и результатам, влияющим на дальнейшее принятие решений и ошибки при изготовлении изделий.

Именно это в настоящее время значительно осложняет использование всего спектра преимуществ применения композиционных материалов и сохраняется необходимость в проведении дорогостоящих испытаний.

Из этого вытекает потребность в проведении оценки достоверности математических и компьютерных моделей при работе с имеющимися данными о физико-механических свойствах материалов. Эти подходы известны с середины 1990-х годов прошлого века: Верификация (Verification), Валидация (Validation), Оценка неопределенностей (Uncertainty Quantification) [73; 74], Калибровка (Calibration), Анализ чувствительности (Sensitivity Analysis), Интервальный анализ (Interval Analysis), наконец, Практическая сходимость результатов (Practical Convergence Checks) – этот достаточно простой для реализации, но эффективный способ применяется с момента возникновения и применения численных (вычислительных) методов. Все эти подходы, методики и практики, в целом, направлены на повышение адекватности математических и компьютерных моделей, включая описание физико-механических свойств материалов. Конечно, среди многочисленных литературных источников в первую очередь нужно назвать фундаментальные работы таких профессиональных научных и инженерных сообществ, как ASME, AIAA, NAFEMS и другие.

Несмотря на наличие в литературе многочисленных описаний математических моделей и физико-механических свойств материалов, существует определенный *недостаток тщательной проверки этих моделей* [75]. Без надлежащего подтверждения экспериментальными данными и тщательной валидации результатов модели материалов могут неточно отображать реальное поведение материала при разнообразных внешних воздействиях, что, как правило, приводит к ошибкам в разработанной конструкции и зачастую сопровождается проблемами с долговечностью, надежностью и безопасностью.

Общепризнано, что обеспечение точности результатов компьютерного моделирования, тем более, суперкомпьютерного моделирования, существенно зависит от исходных данных, среди которых, физико-механические свойства материалов играют, безусловно, важнейшую роль, а потому чрезвычайно актуальной проблемой является наличие обширных экспериментальных данных для валидации математических и компьютерных моделей, результатов компьютерного моделирования, особенно, с точки зрения применения тех или иных элементов передовой технологии цифровых двойников:

- цифровых (виртуальных) испытаний [39; 76], которые, как правило, выполняются значительно быстрее и стоят значительно меньше, чем эксперименты, испытания опытных образцов или, тем более, натурные испытания; достаточно очевидно, что функциональные возможности цифровых испытаний значительно шире, чем экспериментальных исследований и натурных испытаний, особенно, в части варьирования физико-механическими свойствами материалов, их зависимостями от низких и / или высоких температур, высоких и сверхвысоких давлений, скоростей деформирования, ударных, вибрационных и циклических нагрузок, термосиловых воздействий, взаимодействий конструкции с жидкостью или конструкций в жидкости, возможных комбинаций внешних воздействий, включая, безусловно, неблагоприятные комбинации, внешних и внутренних полей (например,

температурных и электромагнитных), наконец, воздействия природных явлений (например, землетрясения, ураганы, штормы, сели и оползни, тяжелые ледовые условия, цунами и многие другие) и результатов деятельности человека;

- цифровых (виртуальных) испытательных стендов, цифровых (виртуальных) испытательных полигонов [5; 39, с. 57], которые, естественно, значительно шире по своим функциональным возможностям, чем натурные стенды и полигоны, но крайне необходимы для качественной валидации, наконец, специализированного бизнес-процесса – цифровой сертификации – специализированного бизнес-процесса, основанного 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, сертификационных и прочих испытаний (Распоряжение Правительства РФ № 3113-р от 11 ноября 2023 года [76]).

В связи с высокой степенью зависимости результатов применения технологий цифрового проектирования и моделирования от исходных данных для компьютерного моделирования возникают риски, связанные с *безопасностью хранения и применения данных*. Например, существует риск утечки или несанкционированного доступа к данным, что может привести к таким проблемам, как ущерб репутации, юридические проблемы и финансовые потери.

Также отсутствие стандартов использования определенных наборов данных, программного обеспечения, типов моделей для конкретных задач может привести к *получению ошибочных результатов вычислений* и рискам, связанным с *некорректной интеграцией решений* от различных разработчиков. Это ведет к проблемам совместимости, потере функциональности, искажению результатов моделирования, некорректной интерпретации результатов моделирования при последующей разработке и внедрении материалов в промышленность.

Риском также является *нехватка квалифицированных специалистов* как в части разработчиков программных решений, так и в части материаловедов. Например, в Великобритании отмечается наибольшая нехватка именно специалистов, которые могут проектировать композиционные материалы [77]. Развитие сегмента цифрового проектирования и моделирование композиционных материалов требует от специалистов постоянного обучения и адаптации, так как дефицит специалистов не позволяет в полной мере реализовать потенциал цифрового материаловедения.

Библиометрический и патентный анализ научных разработок и технологий в области цифрового проектирования и моделирования материалов.

В рамках библиометрического и патентного анализа в области цифрового проектирования и моделирования материалов было выделено относительно небольшое количество патентов и публикаций, что, вероятно, обусловлено новизной рассматриваемой тематики и ограниченным кругом исследовательских организаций и компаний, занимающихся изучением данного направления. Для анализа была использована платформа поиска патентной и научной литературы The Lens (lens.org) [78].

По запросу, отражающему основные технологии по рассматриваемой тематике², осуществлялся поиск в заголовках и аннотациях за период 2010–2025 гг. Среди выделенных патентов большинство относятся к биологии, горной добыче и строительству, поэтому в итоговую выборку попало всего 5 патентов, которые непосредственно посвящены цифровому проектированию и моделированию материалов в промышленности (машиностроении).

Несколько из отобранных патентов описывают способы и системы создания точных моделей материалов для использования в инженерных расчетах. Патент компании Livermore Software Technology Corporation³ US 11347911 B2 «Systems and methods of determining a numerical material model that optimally emulates physical material test results» (2022 год) [79] описывает автоматизированную систему создания точных компьютерных моделей материалов путем сопоставления результатов моделирования с результатами реальных (натурных) испытаний. В процессе сравнения применяется итеративный алгоритм для приведения к сходимости кривых, полученных в ходе реальных и цифровых испытаний материала. Эта технология позволяет получить модели, которые более точно описывают поведение материалов в различных условиях, что критически важно для разработки изделий в различных отраслях.

Патент компании Ansys Inc. US 11797728 B2 «Automating extraction of material model coefficients for simulations» (2023 г.) [80] описывает технологию определения значений коэффициентов моделей материалов на основе данных реальных испытаний материалов физических объектов. Вместо непосредственной подгонки всех параметров модели под экспериментальные данные, предлагается ввести меньшее число «параметров оптимизации» и установить связи между ними и остальными параметрами модели. Это значительно упрощает и ускоряет процесс калибровки, сохраняя при этом высокую точность модели.

Также по рассматриваемой тематике были выделены патенты, описывающие моделирование определенных материалов: полимера с учетом его структуры и металла с учетом влияния способа его обработки (сварка). Патент компании Sumitomo Rubber Ind EP 2778678 B1 «Polymer material simulation method» (2019 год) [81] зарегистрирован в ЕС, США, Японии и Республике Корея. В документе описан способ моделирования полимерного материала и изучения распределения наполнителей в нем на основе молекулярной динамики. Данный способ позволяет учитывать взаимодействия между частицами наполнителя и модифицированными частицами полимера. Моделирование позволяет количественно оценить распределение наполнителя и оптимизировать состав полимерного материала для достижения желаемых свойств.

² Запрос: title:("material simulation") OR title:("materials modeling") OR title:("materials informatics") OR title:("computational materials science") OR title:("numerical material model") OR abstract:("artificial intelligent material model") OR title:("artificial intelligent material model") OR title:("Numerical modelling of materials") OR title:("Physics based materials modeling") OR title:("Numerical Simulations of materials")

³ В 2019 году Livermore Software Technology Corporation (LSTC) была приобретена компанией Ansys, которая является текущим правопреемником патента (как указано в тексте патента).

Патент университета Цинхуа (University Tsinghua) CN 101599103 В «Material model influenced by weld thermal cycle and establishment method thereof» (2011 г.) [82] описывает способ создания численной модели материала, учитывающей влияние термического цикла сварки на изменение его свойств (предел текучести материала). Решение предназначено для применения в моделировании поведения материала в процессе сварки и анализа напряженно-деформированного состояния сварных конструкций.

Среди патентов был также выделен российский патент, зарегистрированный Институтом физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) RU2670922C9 «Способ автоматического построения модели гетерогенной волокнистой внутренней структуры композиционного материала» (2018 г.) [83]. В патенте описан способ создания модели гетерогенной волокнистой структуры композиционного материала с заданными параметрами, которая может быть интегрирована в современные программные комплексы для компьютерного моделирования с использованием лагранжевых численных методов. Способ также включает считывание входных данных выборки композиционных материалов и выполнение последовательности операций построения, если входные данные заданы произвольно или выбраны из данных о реальном объекте.

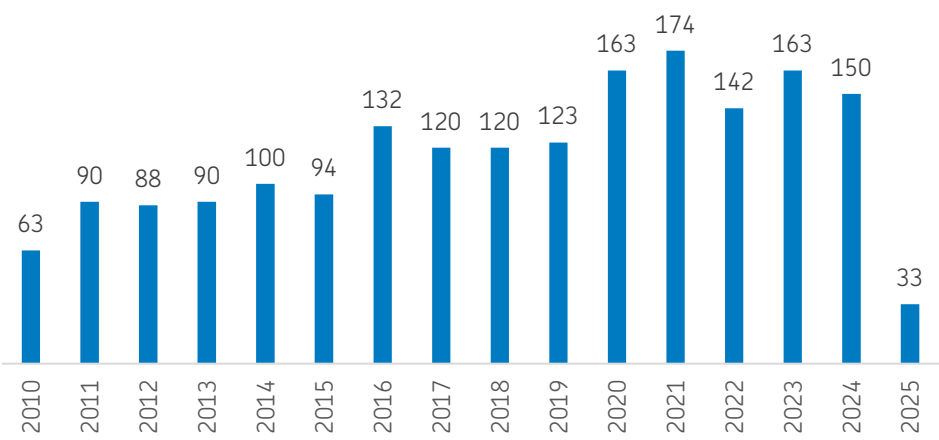
В рамках анализа патентного ландшафта было найдено ограниченное количество патентов, описывающих практическое применение технологий и методов для использования в различных отраслях промышленности, что свидетельствует о постепенном формировании прикладного направления в области цифрового проектирования и моделирования материалов.

Ограниченное число патентов и научных статей в рассматриваемой области, вероятнее всего, связано с тем, что данное направление начало активно формироваться в последние 10–15 лет. Число публикаций за период 2010–2025 гг. составило 1 845 статей. Наибольшее количество статей было опубликовано в 2021 году – 174 статьи. Для поиска статей был оформлен запрос, содержащий основные направления рассматриваемой тематики с исключением таких сфер, как астрономия, биология, науки о Земле и другие⁴.

Среди стран с высокой публикационной активностью можно выделить США (292 статьи), Германию (213 статей) и Китай (184 статьи), где существенное государственное финансирование направлено на поддержку данного направления на протяжении длительного времени.

⁴ Запрос: title:("computational materials science") OR title:("materials simulation") OR title:("materials modeling") – Filters: Year Published = (2010 - 2025) Publication Type = (journal article) External ID Type = (DOI) Subject = (excl Education, excl Astronomy and Astrophysics, excl Biomedical Engineering, excl Molecular Biology, excl Management Science and Operations Research , excl Atmospheric Science, excl General Earth and Planetary Sciences, excl Philosophy, excl Earth and Planetary Sciences (miscellaneous), excl Experimental and Cognitive Psychology) Institution Name = (excl Russian Academy of Sciences, excl Chinese Academy of Sciences)

Рисунок 6. Динамика изменения количества научных публикаций в области цифрового проектирования и моделирования материалов, ед., 2010–2025 гг.



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ на основе данных lens.org, 2025

В этих странах находятся университеты, опубликовавшие за последние 15 лет наибольшее количество статей по рассматриваемой тематике: Рейнско-Вестфальский технический университет города Ахена (RWTH Aachen University, 53 статьи), Университет Клемсона (Clemson University, 24 статьи), Дрезденский технический университет (Dresden University of Technology, 20 статей). Большинство организаций, входящих в ТОП-10 по публикационной активности, находятся в Германии.

Рисунок 7. Количество научных публикаций в области цифрового проектирования и моделирования материалов по странам, ед., 2010–2025 гг.

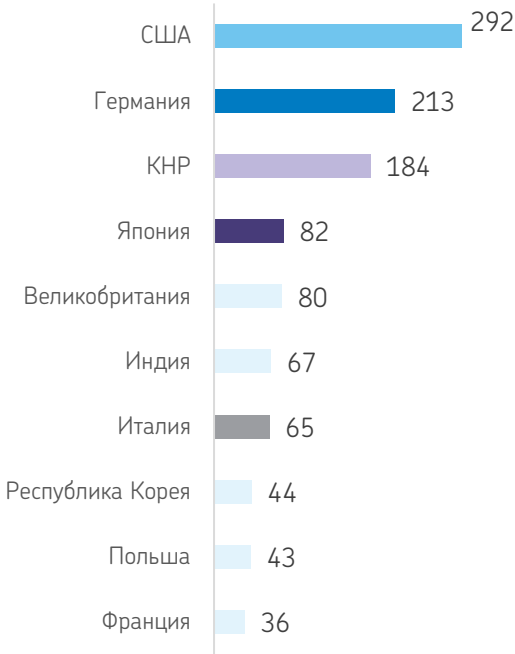
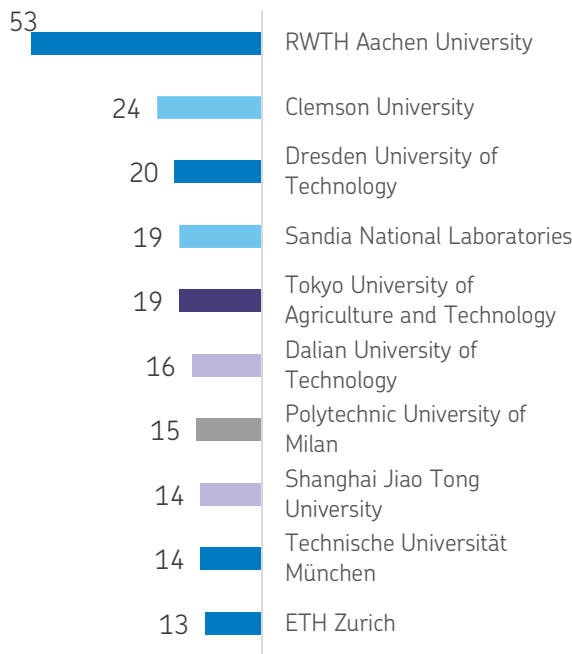


Рисунок 8. Количество научных публикаций в области цифрового проектирования и моделирования материалов по организациям, ед., 2010–2025 гг.



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ на основе данных lens.org, 2025

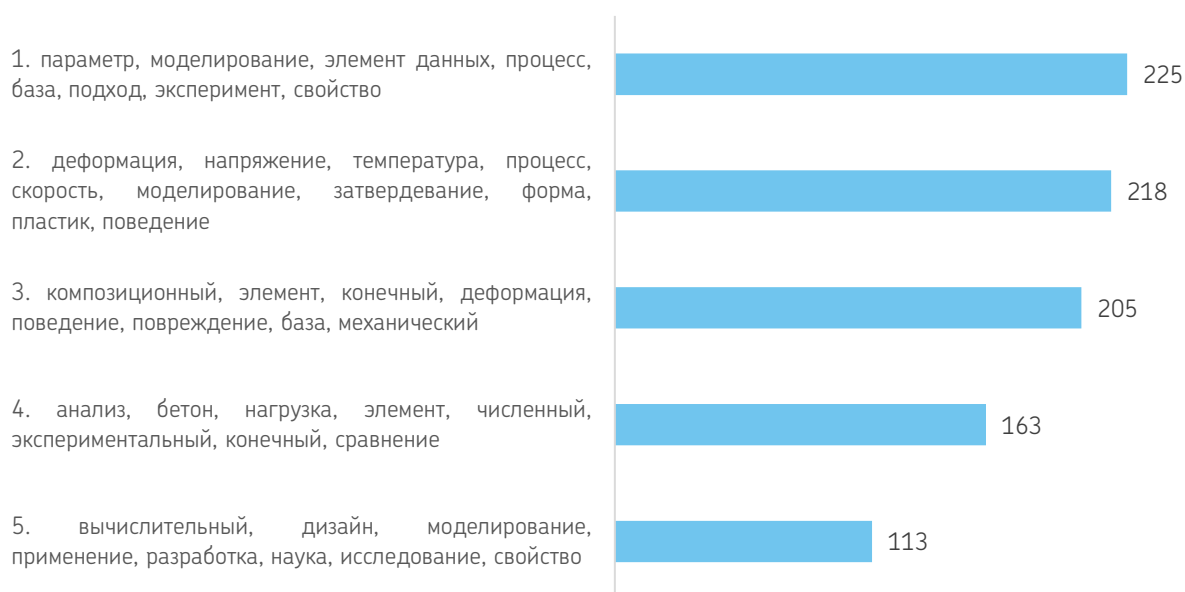
В ходе анализа 1 845 публикаций было отобрано 1 092 статьи, содержащих аннотации, и выделено несколько доминирующих тематик:

1. Повышение точности и надежности моделей материалов на основе экспериментальных данных;
2. Моделирование свойств и поведения материалов при различных внешних воздействиях;
3. Разработка адекватных моделей композиционных материалов для моделирования сложных процессов деформирования, накопления повреждения и разнообразных механизмов разрушения;
4. Разработка моделей материалов для численного моделирования поведения строительных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок;
5. Цифровое материаловедение и применение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения.

Для выявления доминирующих тем научных публикаций использовался инструментарий машинного обучения – машинная модель «Латентное размещение Дирихле» (Latent Dirichlet Allocation, LDA) – байесовская вероятностная модель, основанная на скрытых переменных и распределениях Дирихле. Основными подходами для вероятностных моделей являются вариационные приближения и сэмплирование [84].

Для построения модели использовался алгоритм сэмплирования Гиббса, для которого нужны одномерные условные вероятности [85]. Такой метод позволяет постепенно обновлять переменные, рассчитывая условное распределение темы для каждого слова. В результате каждое слово получает тему с вероятностью, пропорциональной её частоте упоминания в документе и её частоте среди слов данной темы в корпусе слов.

Рисунок 9. LDA-модель доминирующих тематик в научных публикациях в области цифрового проектирования и моделирования материалов, ед., 2010–2025 гг.



Среди выделенных публикаций были рассмотрены наиболее цитируемые статьи в области цифрового проектирования и моделирования материалов:

- Giannozzi P., Andreussi O., Brumme T., Bunau O. *Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO* // Journal of Physics: Condensed Matter – 2017. – Vol. 29, Number 46 – 6 057 цитирование. Статья описывает программное решение с открытым исходным кодом для квантового моделирования свойств материалов с использованием современных методов расчета электронной структуры, которые основаны на теории функционала плотности (density functional theory, DFT) и других [86].
- Aidan P. Thompson, H. Metin Aktulga, Richard Berger, Dan S. Bolintineanu. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales // Computer Physics Communications – 2022. – Vol. 271 – 5 974 цитирования. Публикация описывает алгоритмы, используемые в LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) – программном решении с открытым исходным кодом для моделирования материалов на микро-, мезо- и макро- (континуальное моделирование) уровнях. Также в статье описаны некоторые функции программного решения, включая динамическую балансировку нагрузки, мгновенную визуализацию, квантовое машинное обучение и другие [87].
- Aron Walsh, Shiyu Chen, Su-Huai Wei, Xin-Gao Gong. *Kesterite Thin-Film Solar Cells: Advances in Materials Modelling of Cu₂ZnSnS₄* // Advanced Energy Materials – 2012. – Vol. 2, issue 4 – 638 цитирований. В рамках статьи освещены актуальные задачи моделирования материалов для тонкопленочных солнечных элементов на основе кестерита (Cu₂ZnSnS₄) [88].

Соотношение патентов и публикаций в области цифрового проектирования и моделирования свидетельствует о том, что данная область находится в активной исследовательской фазе, прикладные решения только формируются. Вместе с тем результаты анализа подтверждают ранее выделенные тренды в исследованиях и разработках:

- создание новых химических соединений и композиций с применением хемоинформатики;
- применение программных решений на основе машинного обучения и квантовых вычислений;
- математическое и компьютерное моделирование различных материалов для определённых сфер применения (машиностроение, строительство, электроника и другие).

ГЛАВА 2. ОБЗОР ОСНОВНЫХ ИГРОКОВ РЫНКА ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Сегментация игроков рынка

В ходе исследования проведен анализ ключевых игроков рынка цифрового проектирования и моделирования материалов и изделий из них, включая композиционные материалы. Обзор игроков проведен в соответствии с сегментами рынка, выделенными в Главе 1, а также дополнен решениями, обеспечивающими моделирование технологических процессов. Полный перечень проанализированных игроков рынка цифрового проектирования и моделирования материалов приведен в Приложении. В данном разделе приведен обзор игроков рынка с фокусировкой на композиционных материалах.

Результаты анализа включают обзор зарубежных и отечественных решений для моделирования, описание ключевых игроков рынка и их продуктов в рамках моделирования свойств материалов и изделий из композитов, основные особенности реализуемых бизнес-моделей, примеры крупных инвестиционных проектов, описание сделок по слиянию и поглощению компаний, заключению соглашений о сотрудничестве и кооперации, а также реализуемых на рынке проектов.

Таблица 1. Сегментация основных игроков рынка цифрового проектирования и моделирования материалов с фокусировкой на композиционные материалы

Название компании, страна	Программное обеспечение моделирования свойств материала			Программное обеспечение моделирования технологических процессов изготовления композиционных материалов и изделий из них
	Моделирование материала (Modeling)		Информатика материала (Informatics)	
	Дискретное моделирование (Discrete) Микро- и мезо-уровни	Моделирование сплошной среды (Continuum) Макроуровень		
Зарубежные решения				
Altair Engineering (входит в Siemens Digital Industries Software) (США)	-	✓	✓	-
Ansys (входит в Synopsys) (США)	-	✓	✓	-
Autodesk (США)	-	✓	✓	-
Cadence Design Systems (США)	✓	✓	-	-
COMSOL (Швеция)	-	✓	✓	-
Dassault Systèmes (Франция)	✓	✓	✓	✓
ESI Group (входит в Keysight Technologies) (Франция)	-	✓	-	✓
Hexagon AB (Швеция)	✓	✓	✓	✓

Название компании, страна	Программное обеспечение моделирования свойств материала			Программное обеспечение моделирования технологических процессов изготовления композиционных материалов и изделий из них
	Моделирование материала (Modeling)		Информатика материала (Informatics)	
	Дискретное моделирование (Discrete) Микро- и мезо-уровни	Моделирование сплошной среды (Continuum) Макроуровень		
JSol Corporation (входит в NTT DATA Japan Corporation и The Japan Research Institute, Limited) (Япония)	✓	✓	✓	✓
Siemens Digital Industries Software (США)	✓	✓	-	✓
Synopsys (США)	✓	✓	-	-
Отечественные решения				
ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ» (входит в Госкорпорацию «Росатом»)	-	✓	-	-
НОЦ «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» (НОЦ «СИМПЛЕКС») МГТУ им. Н.Э. Баумана	✓	✓	✓	✓
ООО «ФИДЕСИС» (НТИ)	-	✓	-	-
Научно-технический центр «АПМ» (НТЦ «АПМ») (компания НТИ)	-	✓	-	-
ООО «ТЕСИС» (компания НТИ)	-	✓	-	-
ООО НПО«Программируемые композиты» (ООО НПО «ПК») (компания НТИ)	-	✓	-	-

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам открытых источников [2; 3; 20; 21; 89–92] и официальных сайтов компаний, 2025

Дальнейшее исследование сфокусировано на программных решениях, обеспечивающих моделирование сплошной среды, поскольку этот подход является основой большинства современных программных пакетов инженерного анализа. Кроме того, данные программы широко используются инженерами для решения реальных задач проектирования, расчета прочности, оптимизации конструкций и моделирования технологических процессов, а также лежат в основе инструментов цифрового проектирования и моделирования, что обеспечивается высоким спросом на знания и исследования в этой области.

Хотя моделирование материалов на микро- и мезоуровнях, молекулярная динамика и информатика материалов предоставляют ценную информацию о свойствах материалов на разных уровнях, они часто требуют значительных вычислительных ресурсов, в том числе для масштабирования анализируемых свойств, и не всегда применимы для моделирования крупных и сложных инженерных конструкций. При этом моделирование сплошной среды позволяет описывать поведение материалов, их свойства и связи с учетом процессов деформации и разрушения как на микро- и мезоуровне, так и на макроуровне, что зачастую требуется в инженерных расчетах и в дальнейшем согласуется с данными по результатам экспериментов.

Напомним, что разработчики программных решений инженерного анализа зачастую интерпретируют микроуровень композиционных материалов как уровень между микро- и мезоуровнями относительно масштабов традиционных материалов. Это связано, в первую очередь, с особенностями свойств и структур микронеоднородных композиционных материалов, так и с устоявшимся понятийным аппаратом в данной области с середины 1950-х гг.

Обзор игроков рынка и предлагаемых продуктов

Altair Engineering (с октября 2024 года входит в Siemens Digital Industries Software [93]) – один из крупнейших в мире разработчиков программного обеспечения для инженерного анализа. Ключевая разработка компании – платформа Altair HyperWorks, которая осуществляет поддержку набора инструментов для разработки и производства изделий, в том числе с применением композиционных материалов [7; 94]. Платформа Altair HyperWorks также предлагает доступ к базе данных материалов [95].

Отдельный продукт компании Altair ESAComp™ также предлагает базу данных материалов, позволяет проектировать композитные конструкции и проводить интеграцию с HyperWorks для улучшения процессов предварительной подготовки и постобработки расчетов с композитами. Altair® OptiStruct®, в свою очередь, позволяет прогнозировать разрушение композита, обеспечивает трехэтапный процесс проектирования композитных материалов с оптимизацией формы слоев, количества слоев и последовательности укладки [96]. Altair® Material Data Center™ позволяет просматривать, искать и сравнивать материалы в автономном приложении [97–99].

Решение Altair® Multiscale Designer® направлено на многомасштабное моделирование материалов для всех видов поведения материалов от однородного изотропного до гетерогенного анизотропного [100]. Другой продукт Altair® HyperXtrude – решатель для конечно-элементного моделирования технологических процессов, таких как экструзия, прокатка, сварка, литье под давлением и др. [101]

Altair® RapidMiner® позволяет использовать существующие данные о материалах с помощью технологий машинного обучения для создания моделей синтетических материалов и открытия новых составов.

Другой игрок на рынке цифрового проектирования и моделирования *Ansys* (с 2024 года входит в Synopsys [102; 103]) – крупнейший в мире разработчик программного обеспечения для междисциплинарного моделирования, разработки и производства изделий из композиционных материалов. Программное решение *Ansys Composite PrepPost* – препроцессор для многослойных композитных структур, позволяющий определять и визуализировать сложные компоновки и конструкции [7; 104; 105].

Ansys Granta, отдельная линейка продуктов компании *Ansys*, содержит решения для управления информацией о материалах [106]. *Ansys Granta MI™* предназначено для создания, управления и хранения данных о материалах, а также интегрировано с ведущими CAD-, CAE- и PLM-системами. С помощью *Ansys Granta Selector*, в свою очередь, можно осуществлять тщательный выбор материалов [107]. Другое решение *Ansys Granta Materials Data for Simulation* предоставляет базу данных из более чем 2600 готовых к моделированию универсальных материалов [108], в том числе встроенную в ряд решателей *Ansys* для моделирования.

Также платформа *Ansys Multiphysics* интегрирована с *Multiscale.Sim* разработки *Cybernet Systems Co.*, что позволяет решать задачи, связанные с моделированием и определением свойств материалов на микроуровне [109–111].

Компания *Autodesk* также входит в число крупнейших разработчиков инженерного программного обеспечения в области цифрового проектирования и моделирования. *Autodesk* предлагает, в частности, базу данных материалов *Material Library*, интегрированную в ряд широко используемых продуктов компании, включая *AutoCAD* и *Revit* [112]. *Autodesk Inventor*, в том числе интегрированное решение *Autodesk Inventor Nastran*, позволяет проводить моделирование конструкций с учетом свойств материалов [113; 114].

Cadence Design Systems, разработчик программного и аппаратного обеспечения, специализируется преимущественно на автоматизации проектирования электроники. В 2022 году *Cadence* приобрела *OpenEye Scientific Software* за 500 млн долл., после чего переименовала компанию в *OpenEye Cadence Molecular Sciences* [115]. В рамках деятельности *OpenEye* разрабатывается программное обеспечение для моделирования молекулярной динамики и проведения вычислений на базе облачной платформы [116–118].

COMSOL, известный разработчик инженерного программного обеспечения, предлагает решение *COMSOL Multiphysics®* для моделирования. В структуру *COMSOL Multiphysics®* входит *Model Builder* – модуль для определения геометрии, свойств материалов, физических явлений, выполнения вычислений и оценки результатов [119; 120].

В рамках *COMSOL Multiphysics®* обеспечивается доступ к определению и использованию свойств материалов. Библиотека материалов насчитывает более 17 130 материалов, включая полимеры, композиты с металлической и керамической матрицей, минералы, металлические сплавы, теплоизоляторы, полупроводники, пьезоэлектрические материалы и многое другое, каждый из материалов имеет до 42 ключевых свойств [121].

Модуль Composite Materials Module является дополнением к модулю структурной механики и предоставляет специализированные инструменты моделирования и анализа слоистых композитных структур [122]. Отдельно COMSOL Multiphysics® содержит модуль Metal Processing Module для моделирования металлов в части механических и термических свойств [123].

Другой модуль Nonlinear Structural Materials Module обеспечивает моделирование сложных механических свойств широкого спектра материалов, демонстрирующих нелинейное поведение под нагрузкой [124].

Компания *Dassault Systèmes* также является крупнейшим в мире разработчиком программного обеспечения для разработки и моделирования процессов производства изделий. Среди продуктов компании – BIOVIA Materials Studio, способствующий разработке полимерных композиционных материалов и изделий с применением композиционных материалов [92; 125–128] на основе многомасштабного моделирования, в том числе моделирования динамики.

Структурное моделирование, выполняемое с применением разработки SIMULIA Structural Simulation, обеспечивает математическое и компьютерное моделирование конструкций из композиционных материалов с учетом микронеоднородной структуры и физико-механических характеристик [129]. Модуль Composites Modeler для SIMULIA Abaqus/CAE дополняет и расширяет возможности моделирования слоев [130]. Продукт SOLIDWORKS®, в свою очередь, обеспечивает моделирование литья пластмасс под давлением [131].

ESI Group (с 2023 года входит в Keysight Technologies [132]) – крупнейший в мире разработчик программных средств инженерного анализа. Среди разработок компании можно выделить программную систему PAM-COMPOSITES, обеспечивающую моделирование и анализ технологических процессов изготовления композиционных материалов и деталей из композитов с применением разного вида промышленного оборудования [133; 134]. Решение ProCAST применяется для моделирования литья, включая литье в песчаные формы, литье под давлением, литье по выплавляемым моделям и др. [135] ProCAST обеспечивает анализ микроструктуры, зернистой структуры и механических свойств.

Hexagon, шведский разработчик программного обеспечения мирового уровня, также предлагает ряд инженерных решений для моделирования процессов при разработке и использовании различных материалов [136]. Так, среди продуктов компании – платформа нелинейного многомасштабного моделирования материалов и структур Digimat (продукт разработки MSC Software, с 2017 года – подразделение компании Hexagon), ориентированная на микромеханическое моделирование сложных многофазных материалов, таких как пластмассы, композиты, металлы и эластомеры, и показывающая, как они ведут себя на уровне компонентов, деталей и систем [137; 138].

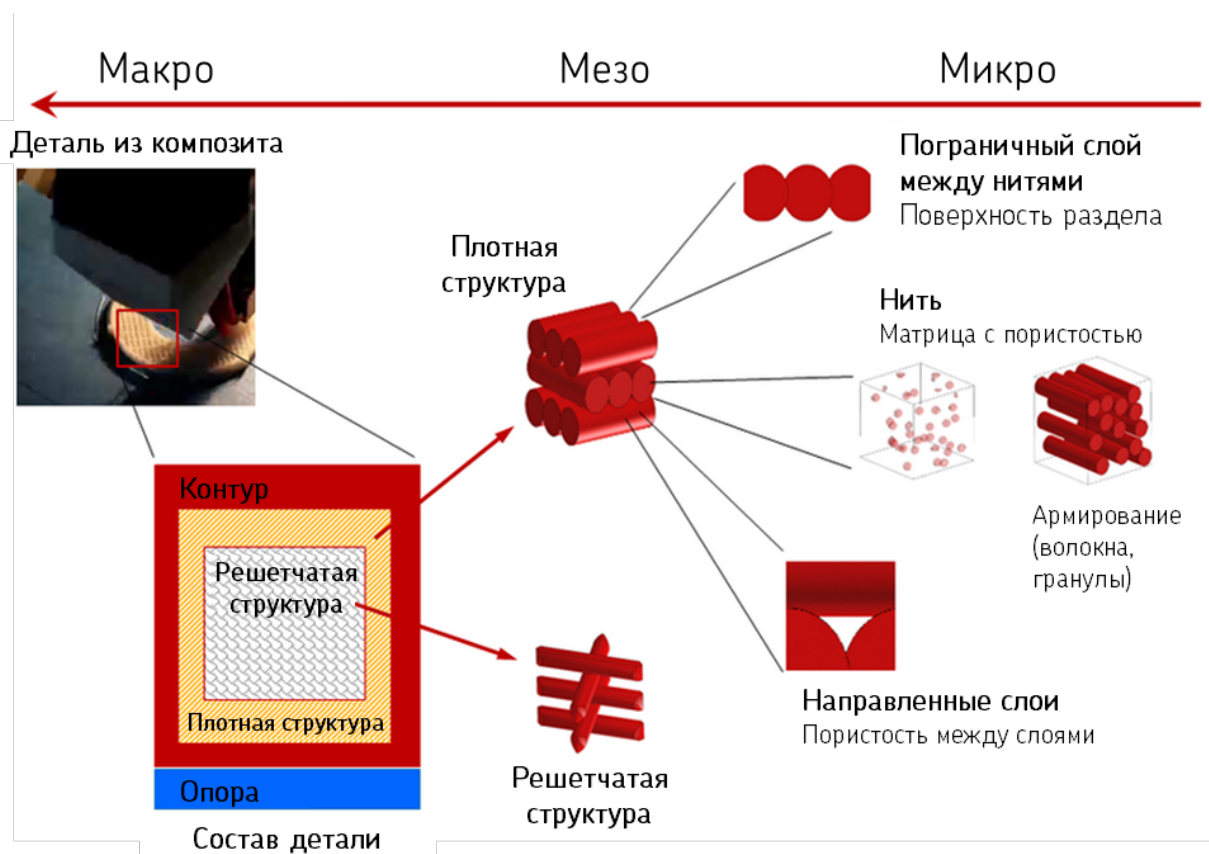
Решения Digimat образуют систему из трех направлений – лаборатория материалов для проектирования и тестирования, инструмент многомасштабного моделирования, комплекс аддитивных технологий с акцентом на применение полимеров и композитов.

Применение Digimat при аддитивном производстве подразумевает анализ материала на микро-, мезо- и макроуровнях. Так, на макроуровне рассматривается опора изделия (опорный элемент конструкции), плотная и решетчатая структура материала [138]. Свойства решетчатой структуры определяются геометрией и выбранными материалами.

Свойства плотной структуры, в свою очередь, зависят от расположения слоев при печати, а также от множества параметров и свойств на микроуровне. Эти параметры включают пористость материала между слоями в соответствии с технологией наложения нитей, пористость слоя в соответствии с параметрами укладки слоев и формы нити после спекания. При этом свойства нити зависят от характеристик и свойств матрицы, армирующих волокон и их ориентации, микропористости.

Таким образом, моделирование технологий изготовления композиционного материала предполагает многоуровневое (многомасштабное) моделирование материала в целях определения его свойств – моделирование свойств нити на микроуровне (который, как было отмечено выше, отличается от масштабов микроуровня традиционных материалов), свойств плотной и решетчатой структуры на мезоуровне и, наконец, моделирование свойств детали на макроуровне.

Рисунок 10. Моделирование материала в Digimat на макро-, мезо- и микроуровне



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам [138], 2025

Процесс моделирования 3D-печати в модуле Digimat-AM предполагает прохождение следующих этапов: ввод данных и параметров печати, получение геометрии детали и модели материала; подготовка процесса печати, включая определение пути инструмента и параметров процесса, ориентацию детали и построение воксельной (Voxel) сетки; моделирование процесса печати с учетом остаточных напряжений и остаточной деформации с целью получения геометрии детали после печати; получение данных о микроструктуре детали после печати, включая пористость и характеристики материала [138].

Hexagon MaterialCenter, в свою очередь, предлагает инструменты для поиска, построения графиков и анализа данных о материалах [139]. Решение может быть интегрировано с системой MaterialCenter Databanks, которая предоставляет базу коммерчески доступных данных о материалах [140]. Кроме того, Hexagon предлагает CAD- и CAM-решение для автоматизированного производства в целях управления траекторией движения инструмента, оптимизации производственных процессов и др. [140]

Отдельно стоит упомянуть MSC Nastran (продукт MSC Software) для проведения конечно-элементного моделирования, который широко применяется для описания свойств и поведения композиционных материалов [141].

JSol Corporation, японский разработчик программных систем (входит в структуру NTT DATA Japan Corporation и The Japan Research Institute, Limited), предлагает ряд программных продуктов для моделирования свойств материалов и процессов изготовления. J-Composites – пакет программ, направленных на моделирование различных процессов формования композиционных материалов и интегрированных с многоцелевым решателем LS-DYNA (*JSol Corporation* является официальным дистрибьютором и партнером по разработке программного обеспечения LS-DYNA (продукт Ansys) в Японии) [142; 143]. В структуру пакета входит Form Modeler – инструмент для настройки анализа прессования, Compression Molding – инструмент для настройки анализа литья под давлением, Fiber Mapper – инструмент для отображения результатов моделирования потока смолы на структурной сетке. Еще одним инструментом, применение которого обеспечит высокоточные процессы изготовления, является интегрированная система моделирования формования JSTAMP, которая также обеспечивает доступ к базе данных материалов [144].

Решение J-OCTA – программное обеспечение для многомасштабного моделирования, которое позволяет прогнозировать свойства на микроуровне в целях проведения исследований и разработки широкого спектра высокоэффективных материалов, таких как смолы, каучуки, нанокompозиты, плёнки, аккумуляторы, а также различные химические составы [145; 146]. J-OCTA предоставляет технологии для получения молекулярной структуры на основе физических свойств и предсказания движения молекул в течение длительного времени на основе результатов краткосрочной молекулярной динамики, при этом J-OCTA интегрировано с технологиями машинного обучения [147].

Siemens Digital Industries Software – крупнейший в мире разработчик программных продуктов, в линейке которого продукт NX Fibersim, специализированное программное решение для эффективного и точного проектирования, моделирования и производства композитных конструкций [148], а также модуль NX Composites для применения композитов при проектировании конструкций [149]. Designcenter также предлагает возможности проектирования композитных конструкций [150].

Решение Simcenter 3D обеспечивает возможности многомасштабного моделирования композиционных материалов [151]. В частности, Simcenter 3D позволяет оптимизировать процесс моделирования композитов и рассчитать процессы литья пластмасс под давлением для минимизации дефектов производства [152]. Simcenter Culgi, в свою очередь, применяется для разработки новых материалов с заданными свойствами с помощью многомасштабного химического моделирования на микро- и мезоуровнях [92; 153].

Synopsys, разработчик программных систем преимущественно для проектирования электроники (EDA), предлагает решение QuantumATK для моделирования материалов на уровне атомов с применением молекулярной динамики [154–157]. Программа применяется для расчета механических, магнитных, тепловых, оптических свойств, определения свойств на уровне электронов, моделирования полимеров, кристаллов, фотоэлектрических материалов и проч. Другим решением Synopsys является программное обеспечение Simpleware, которое используется для обработки и сегментации данных 3D-изображений, создания сетки для дальнейших расчетов и разработки моделей для анализа сложных материалов [158]. Решение Simpleware позволяет описывать композитные микроструктуры и определять эффективные свойства материалов.

Далее рассмотрим отечественные компании, ведущие деятельность на рынке цифрового проектирования и моделирования материалов, в том числе компании «Технет» НТИ, специализирующиеся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования материалов. В ходе анализа было выделено 6 компаний, работающих в рассматриваемой области: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», НОЦ «СИМПЛЕКС» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «ФИДЕСИС», НТЦ «АПМ», ООО «ТЕСИС», ООО НПО «ПК». Из перечисленных организаций 4 участвуют в деятельности НТИ. Перечень компаний, относящихся к НТИ и занимающихся разработкой решений в области цифрового проектирования и моделирования материалов, в том числе композиционных материалов, составлен на основе анализа данных Единой витрины поиска компаний, экспертов, инвестиций и мер поддержки, объединяющей сервисы НТИ «RADAR» [159]. Данный сервис был запущен в августе 2023 года [160].

Помимо компаний в рассматриваемой области в России созданы и действуют Центры компетенций НТИ: Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана [161] и Центр НТИ «Моделирование и разработка новых функциональных материалов с заданными свойствами» на базе НГУ [162], которые ведут разработку программных решений для реализации совместных проектов с компаниями промышленности.

Компании, представленные в перечне, занимаются разработкой и внедрением программного обеспечения (далее – ПО) для инженерного анализа, проектирования и моделирования композиционных материалов и изделий из них. Их деятельность охватывает широкий спектр направлений, включая расчет прочности и динамики конструкций, моделирование течения жидкостей и газов, автоматизацию технологических процессов, проектирование и производство композиционных материалов. Разрабатываемые программные решения и технологии применяются в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, авиастроение, энергетика, приборостроение и др.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (входит в Госкорпорацию «Росатом») – разработчик известного программного обеспечения «ЛОГОС» для инженерного анализа и математического моделирования. Программный продукт включает семь модулей: «ЛОГОС Аэро-Гидро» для моделирования процессов в воздушной и водной средах, «ЛОГОС Тепло» для оценки тепловых характеристик и режимов деталей и узлов, «ЛОГОС Прочность» для решения статических и динамических прочностных задач, «ЛОГОС Гидрогеология» для решения задач водного баланса территорий и моделирования экологических процессов в сложной геологической среде, «ЛОГОС Платформа» для интеграции в единую платформу вычислительных модулей «ЛОГОС» и CAE-систем российских разработчиков, «ЛОГОС Препост» для подготовки геометрических моделей и их последующей

обработки в рамках численного моделирования и анализа различных инженерных задач, «ЛОГОС ЭМИ» для численного моделирования электромагнитных процессов [163–165]. Как отмечают разработчики, продукт применяется на более чем 90 предприятиях высокотехнологичной промышленности. Приобретение продуктов компании возможно через дистрибьюторскую сеть [166; 167].

В модуле «ЛОГОС Тепло» реализованы расчетные возможности моделирования и использования анизотропных материалов [168]. В «ЛОГОС Прочность» реализован учет терморасширения, температурной ползучести материалов и предусмотрена возможность создания пользовательских материалов [169].

«ЛОГОС Прочность» содержит обширную библиотеку моделей материалов, в которую входят модели линейно-упругих, упруго-пластичных, вязкоупругих, хрупких, пористых, композитных материалов, резин, бетонов, грунтов и других материалов. Как отмечают разработчики, база данных свойств материалов, интегрированная в решения «ЛОГОС», регулярно обновляется [170].

Особое внимание следует уделить разработке *Научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» (НОЦ «СИМПЛЕКС»)* МГТУ им. Н. Э. Баумана. Отечественный программный комплекс «Манипула», согласно материалам разработчиков, предназначен для полного цикла моделирования конструкций из композиционных материалов, включая [171; 172]:

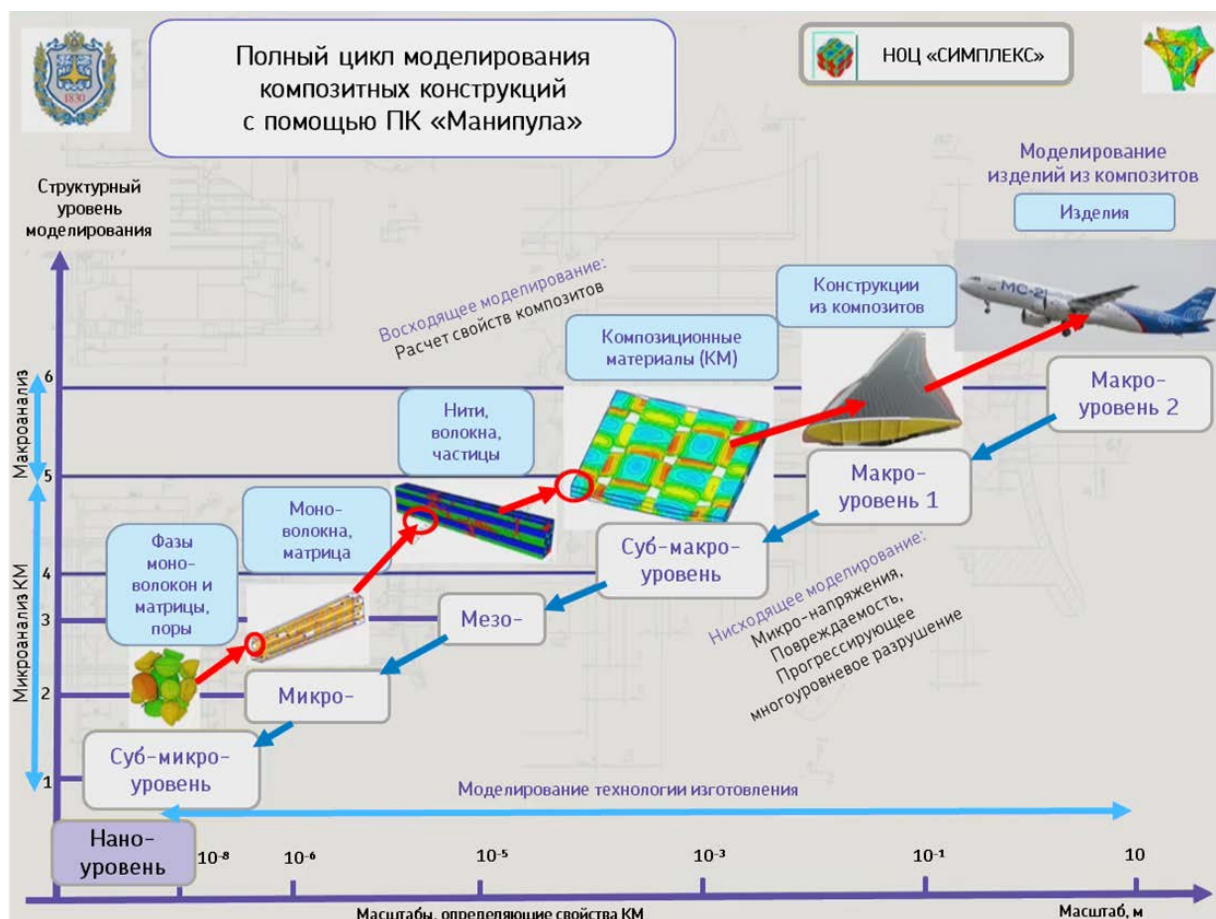
- микроанализ композиционных материалов, математическое и компьютерное моделирование полей и свойств микрон неоднородных материалов;
- макроанализ композиционных материалов, то есть математическое и компьютерное моделирование термоНДС (термо- напряженно-деформированное состояние) конструкций из композитов;
- математическое и компьютерное моделирование технологических процессов изготовления конструкций из композитов.

Основные функциональные возможности программного комплекса «Манипула» были представлены, в частности, на пленарной сессии «CAD/CAE/PLM/PDM-решения – настоящее и будущее инженерного ПО в России» в рамках VI Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии» [171; 173]. Директор Научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов МГТУ им. Н.Э. Баумана» (НОЦ «СИМПЛЕКС»), заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н. Э. Баумана Ю. И. Димитриенко выступил с докладом на тему «Программный комплекс «Манипула» для моделирования композитов и композитных конструкций: современные возможности и перспективы развития». В ходе доклада были представлены основные классы решаемых задач, структура программного комплекса, обширная библиотека 3D-моделей микроструктур композиционных материалов, примеры решения некоторых модельных задач, в частности, процессов моделирования технологии изготовления композитных конструкций: моделирование укладки тканевого наполнителя, отверждение конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), процесс пропитки конструкций из ПКМ и др. [173]

Представленные функциональные возможности программного комплекса «Манипула» обеспечивают решение многомасштабных мультидисциплинарных задач моделирования композиционных материалов с учетом иерархии структурных уровней материи, начиная от элементарных частиц,

атомов и молекул, заканчивая макроскопическими телами и крупными объектами. Важно отметить, что указанные границы уровней расплывчаты, однако отражают важную особенность материи – упомянутую иерархию структурных уровней, когда низшие уровни являются вложенными в высшие уровни. Наличие значительного числа атомов и молекул в объектах позволяет применять для их описания сплошную среду в целях перехода от реальной дискретной структуры веществ к идеализированной непрерывной (континуальной, сплошной) структуре [174].

Рисунок 11. Полный цикл моделирования композитных конструкций с помощью ПК «Манипула»



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Димитриенко Ю. И., директора НОЦ «СИМПЛЕКС» МГТУ им. Н.Э. Баумана [171], 2025

Отдельным направлением развития ПК «Манипула» выступает формирование базы данных композиционных материалов, онтологии материалов, получение данных из обработки экспериментов. В ПК «Манипула» есть специализированный программный модуль для управления данными о материалах, включая композиционные материалы, с физико-механическими характеристиками математических моделей материалов.

Также можно выделить деятельность Центра НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана [161], среди разработок центра – платформа, объединяющая разные виды инструментов цифрового материаловедения, внедрение которой ускорит разработку материалов с заданными свойствами [175; 176]. Архитектура платформы предполагает несколько модулей, которые позволят моделировать материалы на всех уровнях:

электронном, молекулярном, макроскопическом, на уровне детали или конструкции. Для ускорения расчетов также будут интегрированы технологии искусственного интеллекта. В 2026 году планируется представить коммерческую версию разрабатываемой платформы.

ООО «Фидесис» – еще один крупный отечественный разработчик программного обеспечения. ООО «Фидесис» входит в перечень компаний НТИ, является разработчиком и вендором программного пакета Fidesys, предназначенного для инженерного анализа прочности. Программное обеспечение использует передовые научные достижения в области механики сплошной среды, а его расчеты проходят тестирование в соответствии со стандартами международной ассоциации NAFEMS [177]. CAE Fidesys используется также для прочностного анализа механических конструкций и геомеханических расчетов, обеспечивая надежность и предсказуемость технологических процессов [178].

Среди продуктов компании можно выделить CAE Fidesys Composite, применяемый для расчета механических свойств гетерогенных материалов и воксельных моделей [179–181]. Применение CAE Fidesys Composite подразумевает введение свойств материалов, составляющих основу композита, задание геометрических параметров для элементов композита и последующее проведение моделирования.

В числе ключевых направлений деятельности ООО «Фидесис» – создание платформы для автоматизации конструкторских работ, которая снизит затраты предприятий на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), и разработка пакета прочностного анализа, позволяющего решать сложные инженерные задачи с высокой точностью и низкими системными требованиями [182; 183].

Дополнительно инновационный потенциал ООО «Фидесис» подтверждается наличием обширного портфолио патентов, связанных с разработкой программных решений для прочностных расчетов и анализа напряженно-деформированного состояния материалов и конструкций. Запатентованные технологии включают программы для расчета эффективных свойств материалов, моделирования процессов деформации и нагружения, а также модули для работы с аддитивным производством и для параллельных вычислений [184].

НТЦ «АПМ» входит в перечень компаний НТИ, специализируется на разработке компьютерных систем инженерного анализа (CAE) для предприятий и предлагает решения для анализа прочности конструкций из композиционных материалов, создания и расчета слоистых композитов и конструкций из них [185]. Так, опция Composite является дополнительной функциональной возможностью конечно-элементного ядра APM Structure3D, являющегося основой таких программных продуктов, как APM WinMachine и APM Civil Engineering.

Программные решения центра охватывают задачи прочности, динамики, расчетов деталей машин, механики сплошных сред и теплофизики. В 2016 году НТЦ «АПМ» зарегистрировал программный продукт APM WinMachine 14 для прочностного расчета и проектирования конструкций машин и механизмов [186].

APM WinMachine интегрировано с решением FlowVision FSI (Fluid Structure Interaction) крупнейшего отечественного разработчика программных систем ООО «ТЕСИС», который входит в перечень

компаний НТИ [187]. FSI предназначен для интеграции прочностных программных комплексов, таких как APM WinMachine, и программы решения задач аэрогидродинамики FlowVision [188].

ООО «ТЕСИС» предлагает комплексные решения для автоматизации и оснащения конструкторских, расчетных и технологических подразделений на предприятиях различных отраслей промышленности. Ключевым программным продуктом компании является FlowVision. Данная платформа предназначена для моделирования трехмерных течений жидкостей и газа, теплопереноса, взаимодействия жидкости и конструкции (FSI), горения и химических реакций, электромагнитных гидродинамических процессов и т. д. [189] FlowVision также включает поставку библиотеки веществ, которая состоит из базы данных более 30 веществ и инструментов, позволяющих создавать новые вещества и редактировать имеющиеся [190].

ООО НПО «ПК» специализируется на разработке ПО и технологического оборудования для проектирования и производства цельнокатаных 3D преформ для композиционных материалов.

Основные направления деятельности включают проектирование структур преформ, изготовление оборудования для 3D-ткачества, выполнение CAE-расчетов композиционных деталей, а также разработку и модернизацию ПО в соответствии с требованиями заказчиков [191]. ООО НПО «ПК» входит в перечень компаний НТИ.

В рамках анализа отечественных программных решений в области цифрового проектирования и моделирования материалов стоит упомянуть пример, который относится к отдельному направлению и отличается от решений, описанных выше, но представляет ценность для развития материаловедения в России: достижения профессора Оганова А.Р. (Сколтех⁵, МФТИ) и разработанный им метод компьютерного предсказания кристаллических структур (Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography; USPEX). Это программное решение предназначено для предсказания структуры материалов, в том числе низкоразмерных материалов (наночастиц, полимеров, поверхностей, межзеренных границ и 2D-кристаллов).

Метод позволяет эффективно работать с молекулярными кристаллами (в том числе содержащими довольно сложные молекулы). Кроме того, USPEX может предсказывать составы стабильных соединений и соответствующие им кристаллические структуры, исходя только из названий химических элементов. В дополнение к полностью неэмпирическому поиску, USPEX позволяет предсказывать широкий набор метастабильных структур и проводить расчёты с использованием различной информации о системе [192]. Данный метод применяется для решения широкого круга научных задач.

Также обзор некоторых отечественных программных систем проектирования композиционных материалов приведен в [38].

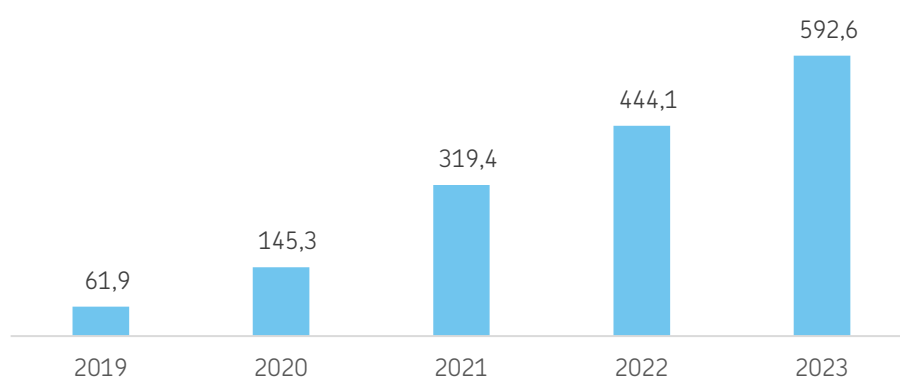
В ходе поиска финансовых данных компаний НТИ по объемам выручки от продажи продуктов и услуг были проанализированы сведения, опубликованные на государственном информационном ресурсе бухгалтерской отчетности (ресурс БФО, формируемый ФНС России и в годовых отчетах организаций [193–196].

⁵ Лаборатория дизайна материалов Сколковского университета науки и технологий

За пятилетний период деятельности (2019–2023 гг.) были найдены данные по всем 4 организациям. Однако по 2 из них информация представлена частично (по ООО «ТЕСИС» отсутствуют показатели за 2019 г., по ООО НПО «ПК» отсутствуют показатели за 2021 г.).

В открытых источниках информации, а также в материалах Единой витрины поиска компаний, экспертов, инвестиций и мер поддержки, объединяющей сервисы НТИ «RADAR», отсутствует информация об экспортной выручке рассматриваемых компаний НТИ, осуществляющих деятельность в области цифрового проектирования моделирования композиционных материалов.

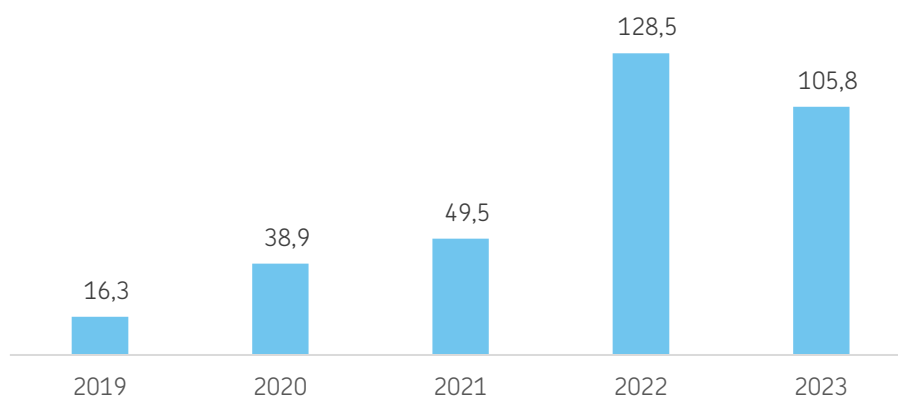
Рисунок 12. Общая выручка компаний НТИ, специализирующихся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования новых материалов (2019–2023 гг., млн руб.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Единой витрины поиска компаний, экспертов, инвестиций и мер поддержки, объединяющей сервисы НТИ «RADAR», ресурса БФО и отчетов компаний, 2025

Наибольший рост общей выручки наблюдался в 2023 году. При анализе медианных значений выручки за указанный период также прослеживается тенденция к росту, достигшая пика в 2022 году.

Рисунок 13. Средняя выручка по медиане компаний НТИ, специализирующихся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования новых материалов (2019–2023 гг., млн руб.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Единой витрины поиска компаний, экспертов, инвестиций и мер поддержки, объединяющей сервисы НТИ «RADAR», ресурса БФО и отчетов компаний, 2025

Рассмотренные отечественные и зарубежные компании реализуют деятельность в рамках бизнес-модели, как правило, в соответствии с четырьмя параметрами [6; 37]. Первый параметр подразумевает метод предоставления решений потребителю – локальное размещение с использованием инфраструктуры заказчика, облачное размещение с применением облачных сервисов или гибридная модель.

Второй параметр, с учетом которого реализуется деятельность игроков рынка цифрового проектирования и моделирования, относится к типу исходного кода – открытый код предполагает более широкие возможности использования решения в сравнении с решениями с закрытым кодом, что является предпочтительным в исследовательских кругах. К третьему параметру относится формат получения основного дохода, который, как правило, формируется за счет распространения лицензий и подписки на услуги компании. Наконец, четвертый параметр подразумевает масштабы диверсификации деятельности, поскольку компании могут получать доход не только от предоставления решений цифрового проектирования и моделирования, но и от услуг по технической поддержке, услуг по модели «программное обеспечение как услуга» (Software-as-a-Service», SaaS), сопровождению проектов внедрения программных систем, выполнения НИР по заказу компаний, проведения обучающих и консультационных мероприятий и др. Кроме того, компании предоставляют различные варианты услуг для физических и юридических лиц, а также образовательных организаций.

Примеры сделок по слиянию и поглощению компаний, сотрудничеству и кооперации, инвестиционным и исследовательским проектам

В части сделок по *слиянию и поглощению* компаний можно выделить приобретения, направленные на усиление основной деятельности компаний.

Так, в 2023 году Altair приобрела OmniQuest, компанию по разработке программного обеспечения для оптимизации. Продукт OmniQuest Genesis представляет собой программное обеспечение для прочностных расчетов и оптимизации, которое использует метод конечных элементов для решения задач со многими переменными и ограничениями [197]. Genesis широко применяется в автомобильной отрасли, а также для моделирования спортивных автомобилей с применением композиционных конструкций.

В 2024 году Cadence Design Systems объявила о завершении приобретения BETA CAE Systems International AG, разработчика решений для инженерного моделирования. BETA CAE усиливает позицию Cadence в части реализации стратегии Intelligent System Design™ для проектирования и моделирования интеллектуальных систем [198].

Также важно отметить сделку Synopsys по приобретению Ansys в 2024–2025 гг. в целях формирования линейки программных продуктов, позволяющих «моделировать всё от электроники до физических процессов» [102]. Не менее значимой сделкой на рынке цифрового проектирования и моделирования является приобретение компанией Siemens Digital Industries Software разработчика инженерных программ Altair Engineering в 2024 году [93]. Еще один яркий пример слияния на рынке цифрового проектирования и моделирования относится к приобретению ESI Group компанией Keysight Technologies в 2023 году [132].

Приведенные примеры демонстрируют значительную трансформацию рынка инженерного программного обеспечения и отражают тенденцию по консолидации основных игроков рынка. Как отмечают эксперты, консолидация на зарубежном рынке программных систем способствует снижению фрагментации рынка и формированию игроков-лидеров, стратегически нацеленных на предоставление наиболее комплексного продукта в своем направлении, что также обеспечивает ликвидацию конкурентов, расширение клиентской базы и увеличение доходности [199].

Отечественный рынок, в свою очередь, представлен не таким значительным числом отдельных компаний-разработчиков, которые при этом поглощают, как правило, мелкие компании и стартапы, в связи с чем наиболее эффективное решение заключается в кооперации крупных игроков.

В части *кооперации* основных игроков рынка можно выделить как развитие совместных продуктов, так и заключение партнерства с целью дистрибьюции инженерных программных систем.

Так, в 2024 году Altair объявил о сотрудничестве с HP Inc. в области материалов в целях развития продукта Altair® Material Data Center™ и сокращения разрыва между проектированием деталей и их производством на 3D-принтере [200]. В рамках сотрудничества продукт Altair будет дополнен информацией о материалах, предоставленной компаниями, что позволит проводить прочностные расчеты с использованием конечно-элементного анализа, а также прогнозировать и устранять производственные дефекты во время проектирования и моделирования.

Также в 2024 году Altair заключил соглашение с Cimatron Ltd. (входит в Sandvik Group) о партнерстве в области дистрибьюции продукции [201]. Cimatron расширит присутствие на рынке продуктов цифрового проектирования и моделирования, таких как платформа Altair® HyperWorks®, решения Altair для литья под давлением и формовки металла, Altair® Inspire™ Mold и Altair® Inspire™ Form.

Quilted Stratum Design (QSD®) – разработанный совместно Cetim и Altair программный продукт на основе результатов исследований ONERA, в рамках которых создан метод оптимизации проектирования и сокращения времени расчета при максимизации области решения [202].

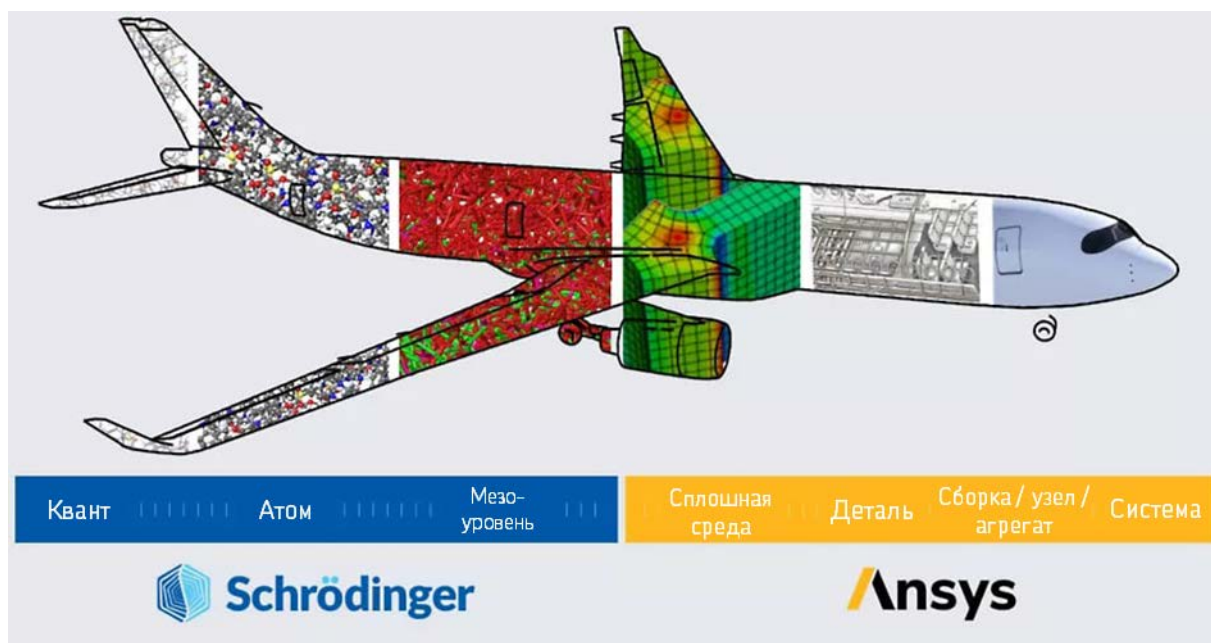
Так, QSD® предлагает интуитивно понятный рабочий процесс в среде Altair® HyperMesh®, который обеспечивает создание оптимизированной конструкции из композиционных материалов с адаптированной ориентацией волокон и уменьшенным количеством отходов материала благодаря анализу драпировки. QSD® направлен на проектирование эффективных конструкционных деталей, изготовленных из горячепрессованных многослойных заготовок термопластичных слоев.

В 2024 году компания Ansys заключила значимое соглашение с компанией Schrödinger, специализирующейся в области моделирования свойств материалов на молекулярном уровне [203]. Сотрудничество направлено на применение интегрированного подхода к вычислительной инженерии материалов (Integrated Computational Materials Engineering, ICME) для разработки продукта, который обеспечит определение свойств материалов разных уровней на ранних этапах проектирования.

Подход ICME позволяет клиентам определить, какие свойства материала необходимы для соответствия стандартам спецификации, после чего разработчики могут генерировать свойства материала с помощью инструментов молекулярного моделирования Schrödinger и использовать их в инструментах моделирования Ansys для оценки производительности продукта на основе прогнозируемых данных о материалах.

Также в 2024 году Ansys и компания Schaeffler, специализирующаяся на технологиях движения, продлили соглашение о сотрудничестве [204]. Совместная работа будет направлена на стандартизацию процессов разработки продукции Schaeffler с применением решений Ansys Mechanical™, Ansys Fluent™, Ansys Electronics™ и Ansys Motor-CAD™.

Рисунок 14. Моделирование изделий инструментами Ansys с учетом анализа свойств материалов инструментами Schrödinger на разных уровнях детализации



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Ansys [203], 2025

Отдельное направление сотрудничества Ansys и Schaeffler направлено на формирование «цифровой нити» и «материального интеллекта» (material intelligence) в процессах инжиниринга. Это включает анализ данных о составе материала в процесс исследований и разработок для обеспечения учета и сокращения отходов и потенциальных выбросов в окружающую среду.

В 2024 году также было продлено соглашение между ESI Group и FAW-Volkswagen TE, направленное на стратегическое партнерство для развития интеллектуального моделирования в автомобилестроении [205]. В рамках сотрудничества планируется создание локализованной базы данных материалов для автомобильной промышленности, что укрепит позиции Volkswagen в области технологий интеллектуального моделирования. В ходе реализации заключенного ранее меморандума о взаимопонимании была создана совместная лаборатория по тестированию материалов и интеллектуальному моделированию.

Отечественные разработчики программного обеспечения также активно формируют технологические партнерства. В частности, компания «Моделирование и цифровые двойники» и ООО «Фидесис» в 2023 году подписали соглашение о партнерстве с целью объединить научные исследования, проводимые обеими компаниями, для создания новых программных решений, а также улучшения функциональности уже существующих разработок в области расчета прочности материалов [206].

Новое совместное программное обеспечение будет включать различные компоненты, такие как модули, базы данных, плагины и другие программные решения. Оно будет содержать новые функции, улучшения, дополнения или модификации ПО CAE Fidesys, а также других продуктов и технологий, разрабатываемых на его основе.

Другим примером выступает получение компанией ГК Softline (ПАО «Софтлайн»), поставщика решений и сервисов в области цифровой трансформации, статуса золотого партнера вендора НТЦ «АПМ» [207]. Получение нового статуса демонстрирует активную партнерскую работу и выполнение ГК Softline ряда критериев, включая наличие успешных проектов. В рамках партнерства проводятся совместные мероприятия, в том числе конференции российских разработчиков программного обеспечения для предприятий промышленного сектора, а также обучающие активности, посвященные функциональным возможностям программных продуктов и примерам реализации отраслевых проектов с применением программных систем.

Кроме того, иллюстративным примером сотрудничества среди отечественных разработчиков программного обеспечения является деятельность консорциума разработчиков инженерного программного обеспечения «РазВИТие», который объединяет российские компании АСКОН, НТЦ «АПМ», ADEM, ООО «ТЕСИС», ЭРЕМЕКС, IOS [208]. Цель консорциума заключается в создании отечественного сквозного решения для проектирования и управления жизненным циклом сложных машиностроительных изделий (PLM). Сквозное решение консорциума «РазВИТие» предполагает применение различных программных инструментов (САПР, расчетных пакетов, инструментов для проектирования технологий изготовления, анализа качества, планирования работ, диспетчеризации производства и др.) [209].

В ближайшие годы консорциум «РазВИТие» планирует завершить доработку основных инструментов проектирования (CAD) и управления жизненным циклом изделия (PLM), а также реализовать функциональность, относящуюся к повышению интеллектуальности проектирования с использованием вычислительных методов [210; 211].

Инвестиционные проекты на рынке цифрового проектирования и моделирования направлены преимущественно на расширение дистрибьюции продуктов и представительства на территории других стран. Например, Altair в 2024 году открыл новые офисы в Греции [212] и Израиле [213], что дополняет существующие офисы компании в соответствующих регионах мира и объясняется возросшим спросом на продукты Altair. Кроме того, в 2024 году Altair открыл также первый офис в Швейцарии [214], что свидетельствует об экономической эффективности деятельности компании в странах Европы и высоком уровне спроса, что так же отразится на охвате деятельности концерна Siemens, купившем компанию.

В рамках своей деятельности компании не только разрабатывают и совершенствуют программные решения для инженерного анализа, но и реализуют *проекты*, направленные на внедрение

передовых цифровых технологий в промышленность. Проекты, реализуемые основными игроками рынка цифрового проектирования и моделирования, преимущественно носят закрытый характер. Среди ключевых направлений реализации открытых совместных проектов можно выделить интеграцию технологий искусственного интеллекта в процессы проектирования и моделирования, а также развитие экосистемы для совместной работы и использования данных.

Например, в 2024 году Autodesk представила исследовательский проект Bernini по разработке генеративного искусственного интеллекта для создания 3D-форм в проектировании и производстве [215]. Проект реализован Лабораторией искусственного интеллекта Autodesk в сотрудничестве с Китайским университетом Гонконга.

Проект Bernini – это часть комплексной стратегии Autodesk AI, направленной на предоставление интеллектуальных возможностей продуктов. В ходе этой работы Autodesk стремится встраивать безопасность, прозрачность и гуманность в разработку и использование технологий искусственного интеллекта.

Другим примером сотрудничества в области цифрового проектирования и моделирования с учетом свойств материалов выступает совместный исследовательский и инновационный проект DOME 4.0 («Цифровая открытая рыночная экосистема 4.0»), реализованный Siemens Digital Industries Software и Citrine Informatics и поддержанный европейской программой Horizon 2020 [216]. Суммарно грант составил 4,036 млн евро (4,59 млн долл.) на реализацию проекта, дата завершения проекта – ноябрь 2024 года [217]. В рамках проекта Siemens предлагает применение Simcenter 3D для моделирования на основе данных для повышения эффективности обнаружения свойств материалов при разработке продукции. Citrine Informatics дополняет пространство решений подходом, ориентированным на применение машинного обучения. Проект направлен на реализацию цифровой платформы для объединения источников данных о материалах и пошаговое изменение обмена данными о материалах между организациями для формирования экосистемы совместной работы. Еще одним партнером и консультантом проекта выступает компания SABIC, глобальная нефтехимическая корпорация Саудовской Аравии с диверсифицированной деятельностью.

Дополнительным направлением реализации совместных проектов выступает деятельность в области сертификации. Так, в 2024 году состоялась презентация проекта «Экспериментально-цифровая платформа сертификации», реализованного в рамках плана мероприятий («дорожной карты») «Технет 4.0» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы [218–221]. Проект реализуется консорциумом исполнителей во главе с компанией ООО «ТЕСИС» в партнёрстве со Сколковским институтом науки и технологий за счет финансовых средств поддержки согласно Постановлению Правительства РФ от 18 апреля 2016 года № 317 и за счет собственных средств предприятий-участников.

Экспериментально-цифровая платформа сертификации направлена на разработку и применение методик ускоренной оценки соответствия изделий установленным требованиям на основании цифровых (виртуальных) испытаний с применением цифровых моделей изделий. Применение данных методик на основании результатов цифровых испытаний призвано обеспечить сокращение затрат на сертификацию изделий из полимерных композиционных материалов.

Структура платформы включает такие модули, как управление информационной системой; база знаний; управление физико-механическими моделями; конструкторское проектирование; сертификация; идентификация свойств материалов; управление цифровыми моделями; валидация цифровых моделей; виртуальные испытания; неразрушающий контроль; связь с образовательным порталом; управление задачами проекта.

Также можно отметить проект, реализуемый Госкорпорацией «Росатом», по созданию отечественной платформы для управления данными о свойствах материалов [222]. В 2024 году «Росатом» создал компанию АО «Оператор ТМИК» – «Оператор платформы «Технологии, материалы, конструкции», которая будет способствовать объединению информации о свойствах материалов, в том числе композитов, с технологиями их производства и применения в различных конструкциях на базе единой платформы.

ООО «Фидесис» осуществляет проекты, направленные на автоматизацию инженерного анализа и создание инновационных расчетных решений, обеспечивающих повышение эффективности конструкторских работ. Одним из таких проектов стало сотрудничество с ПАО «Пензкомпрессормаш» по разработке технологий получения композиционных материалов нового поколения и конструктивных решений для опор.

Работа включала 3D-моделирование для разработки методики расчета сопротивления материала к нагрузкам, определение предельных нагрузок, приводящих к разрушению опоры, и создание ПО для прочностного анализа опор при изготовлении и анализе результатов [223]. Компания использует собственные программные решения, такие как CAE Fidesys Professional и CAE Fidesys HPC, а также CAE Fidesys Composite [224].

НТЦ «АПМ» реализует проекты, направленные на проведение сложных инженерных расчетов и экспертиз в различных отраслях промышленности. Компания проводит расчеты оборудования АЭС, включая прочностной анализ объектов использования атомной энергии как функционирующих, так и готовящихся к запуску [225].

В рамках заказа Российского экспертного фонда «ТЕХЭКО» НТЦ «АПМ» провел исследования для определения причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, включая расчеты прочности элементов гидроагрегата [226]. Центр выполнил расчет основания буровой установки для ООО «Клевер» с использованием APM Civil Engineering [227], а также провел анализ для сертификации аттракционов для группы компаний «Русские аттракционные системы» [228].

ООО «ТЕСИС» разрабатывает программное обеспечение, а также выполняет расчеты и оптимизацию конструкций. В рамках этого направления компания реализовала проекты по оптимизации узлов крепления грузов транспортного самолета, что позволило снизить вес конструкции [229].

Также в сотрудничестве с Уральским заводом гражданской авиации (УЗГА) компания разрабатывает методы междисциплинарного моделирования и создания цифровых двойников авиационной техники с использованием FlowVision [230].

ООО НПО «ПК» разрабатывает инновационные решения в области композиционных материалов и текстильных технологий. Компания работает над проектом по проектированию 3D текстильных преформ для аэрокосмической отрасли.

Предполагается, что за счет более точного описания геометрической модели преформы и сокращения количества проводимых натурных экспериментов удастся снизить стоимость проектирования изделий из композиционных материалов для аэрокосмической отрасли на 10–15% [231].

Также разрабатывается ПО и оборудование для производства цельнотканых 3D преформ. Данная технология позволяет создавать прочные армирующие структуры для изделий из композиционных материалов [232]. В рамках сотрудничества с ПАО «ОДК–САТУРН» был реализован проект по разработке методов и средств экспериментального измерения технологических свойств высокомолекулярных нитей [233]. Кроме того, специалистами КБ «ОДК–Авиадвигатель» применяется разработанная российской компанией АСКОН, система «КОМПАС–Композиты» для проектирования деталей авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов. С помощью данной системы они спроектировали экспериментальную деталь для ПД-14 [234].

Реализуемые на рынке цифрового проектирования и моделирования проекты являются преимущественно успешными и способствуют созданию конкурентоспособной продукции. Тем не менее в рамках проведенного анализа [6] выявлены основные причины закрытия неудавшихся проектов.

Такие причины включают смену приоритетов компании, сложности технической реализации проектов по внедрению технологий цифрового проектирования и моделирования, высокий уровень технической сложности разрабатываемых изделий, высокая стоимость продукции в связи с внешними факторами, которые невозможно решить применением технологий цифрового проектирования и моделирования, и др. Кроме того, отдельными причинами закрытия проектов могут выступать трудности, связанные с недостаточным спросом на некоторые разработки в области композиционных материалов, высокая сложность реализации проектов по данному направлению, а также влияние экономических и геополитических факторов [7].

ГЛАВА 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Нормативно-правовое регулирование, в том числе анализ государственных программ поддержки НИР и НИОКР в области цифрового проектирования и моделирования материалов

В рамках экспертно-аналитического доклада рассматривается область, находящаяся на стыке двух технологических направлений – цифрового проектирования и моделирования и материаловедения. Данные направления входят в число приоритетных направлений технологического развития государств и зафиксированы в рамочных стратегических документах. Большинство стран оказывают поддержку в рамках имеющихся мер стимулирования научных исследований и разработок, охватывающих широкий спектр технологических направлений (например, Бразилия, ЮАР, Иран, Египет). Некоторые страны поддерживают отдельно каждое направление в рамках профильных программ и национальных проектов (например, страны ЕС, США, Китай, Россия) [6; 7].

Вместе с тем можно выделить несколько государственных инициатив, направленных на развитие исследований и разработок в рассматриваемой области, объединяющей два направления в одно – цифровое моделирование материалов. Одной из таких инициатив является запущенная в США в 2011 году Межведомственная инициатива «Геном материалов» (Materials Genome Initiative) [235], целью которой является ускорение разработки, развития и внедрения передовых материалов в различных секторах промышленности страны. Инициатива реализуется при поддержке федеральных ведомств, которые финансируют ряд исследовательских программ и проектов, привлекая крупные исследовательские центры к разработке новых материалов с применением цифрового моделирования, высокопроизводительных вычислений, искусственного интеллекта и больших данных.

В развитие инициативы Национальным научным фондом США (National Science Foundation, NSF) в 2012 году была запущена программа «Разработка материалов для революции и создания нашего будущего» (Designing Materials to Revolutionize and Engineer our Future, DMREF). В течение 10 лет (по 2022 год) было инвестировано более 270 млн долл. в поддержку фундаментальных научных исследований 250 команд [236]. Объем финансирования проекта длительностью 4 года составляет 1,5–2 млн долл. [237] Проекты направлены на моделирование биоматериалов, суперсплавов, конструкционных материалов, термопластичных полимеров с применением баз данных, цифровых платформ и искусственного интеллекта, в том числе машинного обучения для прогнозирования новых свойств материалов [238]. Например, один из проектов, поддержанный в 2023 году, посвящен разработке интегрированной экспериментальной и вычислительной базы данных полимеров, которые могут выдерживать экстремальные условия и механические воздействия и восстанавливаться при повреждении. Такие полимеры могут быть востребованы для производства носимых датчиков, мягких приводов и устройств получения энергии [239]. Также в рамках программы были созданы открытые базы данных и программное обеспечение для автоматизированного анализа свойств материалов, моделирования материалов для применения в определенных областях (узкоспециализированное применение), цифровые инструменты для работы с наноструктурой материалов [236; 240].

Исследования в области моделирования материалов также поддерживаны в рамках деятельности Министерства энергетики США. Например, Министерством в рамках собственных программ «Фундаментальные исследования в области энергетики» (Basic Energy Sciences, BES) и «Передовые научные исследования в области вычислений» (Advanced Scientific Computing Research, ASCR) поддержан крупный проект по созданию базы данных с открытым доступом для поиска и просмотра свойств всех известных твердотельных материалов, новых материалов, материалов со стабильной кристаллической структурой и связанных с ними аналитических алгоритмов – Materials Project [241]. В рамках программы Computational Materials Sciences (CMS) Министерством энергетики поддержано 11 проектов по разработке программного обеспечения и баз данных свойств материалов для моделирования новых функциональных материалов с применением петафлопсных и эксафлопсных высокопроизводительных компьютеров с целью дальнейшего применения решений в промышленности [242].

В Китае в 2016 году также был запущен национальный проект в области критических технологий – «Инженерия генома материалов» (Materials Genome Engineering, MGE) [243], с целью сокращения вдвое стоимости и времени осуществления НИОКР по таким направлениям, как: материалы, используемые в энергетике, биомедицинские материалы, функциональные материалы на основе редкоземельных элементов, каталитические материалы и специальные сплавы. Финансирование проекта составило 150 млн долл. [244] В рамках проекта поддержка направлена на исследования в области: высокопроизводительных методов вычислений и определения свойств материалов с применением данных технологий, больших данных о материалах и оценки технических характеристик изделий из новых материалов в процессе эксплуатации [243; 245]. В рамках проекта были разработаны две платформы: платформа информатики материалов (Materials Informatics Platform, MIP) [246] и национальная платформа обслуживания и управления данными о материалах (National Materials Data Management and Service platform, NMDMS) [247; 248]. Также исследования в области цифрового моделирования материалов ведутся в рамках деятельности Пекинского научно-исследовательского центра вычислений (Beijing Computational Science Research Center, CSRC) [249; 250], охватывая такие направления, как физика конденсированных сред, функциональные материалы, полупроводниковые материалы, фотоэлектрические материалы и другие.

Кроме того, в Китае ведется работа по созданию большого центра обработки данных, предназначенного для разработки новых материалов, который будет полностью введен в эксплуатацию в 2035 году. Предполагается, что формирование инфраструктуры будет стимулировать развитие решений в области управления данными и их применения в исследовании новых материалов, что, в свою очередь, обеспечит Китаю значительное конкурентное преимущество в этом направлении [251].

Исследования в данном направлении поддерживаны и другими государствами. Например, **Европейским союзом** в 2015–2018 гг. в рамках инновационной программы Horizon 2020 финансировалось создание лаборатории по исследованию новых материалов (Novel Materials Discovery Laboratory, NOMAD) [252]. Лабораторией разработана платформа для обмена и использования данных по вычислительному материаловедению.

К настоящему моменту на платформе развернут репозиторий данных, архив всех обработанных данных, представленных в унифицированном виде, энциклопедия расчетных данных материалов и инструментов для анализа обработанных данных, в том числе на основе искусственного интеллекта [253] (подобные исследовательские центры и лаборатории (Computational Materials Science Centers and Projects Around the World) представлены и в других странах [254]).

В рамках программы Horizon 2020 был поддержан еще один проект по созданию центра передовых технологий – MAX (MAterials design at eXascale), деятельность которого сфокусирована на квантовом моделировании материалов с применением технологий анализа данных и высокопроизводительных вычислений (HPC). Центром были разработаны библиотеки с открытым исходным кодом, предназначенные для применения в процессе моделирования материалов, используемых в определенных областях, а также разработаны специализированные математические и системные базы данных (mathematical and system libraries), которые выполняют задачи общего назначения (например, управление памятью, связью и хранением данных) или математические задачи (обычно, но не ограничиваясь, линейная алгебра и анализ сигналов) [255].

Также в 2022–2023 годах были запущены 5 проектов по развитию методов определения свойств и численного моделирования материалов на период до 2026 года, общее финансирование которых составило 24 млн евро:

- проект MatCHMaker направлен на создание открытой отраслевой среды / системы данных для многомасштабного моделирования материалов, основанного на законах физики и данных [256];
- проект AddMorePower посвящен усовершенствованию методов определения свойств материалов на основе рентгеновского излучения и электронного зондирования, а также подходов к моделированию материалов для изготовления силовых полупроводниковых приборов [257];
- проект AID4GREENEST направлен на разработку новых составов стали за счет применения методов определения свойств материалов на основе искусственного интеллекта и инструментов моделирования (GREEN Steel) [258];
- проект CoBRAIN нацелен на разработку решений для термического напыления покрытий за счет интеграции экспериментальных данных и вычислительных технологий моделирования материалов [259];
- проект D-STANDART предполагает разработку методов моделирования прочности больших конструкций из композиционных материалов с произвольным расположением слоев. В рамках проекта применяются методы суррогатного моделирования, интегрированные с технологиями искусственного интеллекта [260].

С 2023 года также реализуется проект DiMAT (Digital Modelling and Simulation for Design, Processing and Manufacturing of Advanced Materials) [261], направленный на вовлечение малых и средних предприятий в разработку новых материалов, включая их моделирование, обработку и производство. В рамках проекта компаниям предоставляется доступ к цифровым инструментам и вычислительным ресурсам.

В ходе проекта будут разработаны 3 решения: для хранения, обмена, представления и оценки данных о материалах; для проектирования внутренней структуры и свойств материалов с целью прогнозирования поведения материалов до производства; для создания эффективных процессов моделирования производства материалов и описания поведения моделей механических свойств материалов для использования в обучении ИИ и алгоритмах предсказания. Демонстрация решений планируется в рамках пилотных проектов европейских разработчиков и производителей текстиля, композиционных материалов, стекла и графита [262].

Исследования в области цифрового моделирования материалов также ведутся при поддержке правительства **Индии** в научных центрах страны. Например, в рамках Миссии инноваций (Mission Innovation, MI) [263] в 2022 году на базе нескольких институтов были запущены три платформы производства экологически чистых материалов (Integrated Clean Energy Material Acceleration Platforms) [264] с целью ускорения до 10 раз темпов создания материалов с применением высокопроизводительных вычислений, искусственного интеллекта, машинного обучения и робототехники. Ведущим институтом в области материаловедения, возглавляющим одну из платформ, является Индийский технологический институт (Indian Institute of Technology, IIT Kanpur), задачей которого является разработка материалов для систем накопления энергии с помощью атомарного моделирования с использованием квантовой и классической механики, а также алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения.

В **Российской Федерации** также ведутся работы по цифровому проектированию и моделированию материалов и изделий из них, которые поддержаны в рамках текущих государственных инициатив и мер содействия (федеральный проект «Передовые инженерные школы», ПИШ; программа «Приоритет-2030», Национальная технологическая инициатива и Центры компетенций НТИ, Национальные центры мирового уровня, гранты РНФ, РФФИ и др.) [7] и реализуются такими технологическими центрами на базе университетов, как: Передовая инженерная школа СПбПУ «Цифровой инжиниринг», Центр превосходства «Цифровое материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «СИМПЛЕКС» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Лаборатория дизайна материалов Сколковского университета науки и технологий, Центр компетенций НТИ «Моделирование и разработка новых функциональных материалов с заданными свойствами» НГУ и другими [161; 162].

С целью развития новых материалов в стране в 2024 году был принят национальный проект «Новые материалы и химия» [265], финансирование которого в 2025–2030 гг. составит около 170 млрд рублей [17]. Реализация проекта обеспечит достижение технологической независимости, создание условий для формирования новых рынков и технологического лидерства в отраслях производства: химической и биотехнологической продукции, новых и перспективных материалов, редких и редкоземельных металлов [266]. В перспективе до 2030 года ожидается достижение ряда показателей, в том числе 100% достижение уровня технологической независимости по новым материалам и химии, а также снижение доли импорта химической продукции в объеме потребления до 30% [266].

В ближайшие три года (до 2027 г.) будет выделено финансирование на создание научной и научно-производственной инфраструктуры учреждений, подведомственных Минобрнауки России, и НИЦ «Курчатовский институт» в области материалов и химических веществ. Ожидается, что за этот период будет создано 9 площадок для опытно-промышленного производства и масштабирования продукции химических веществ, а также проведены дополнительные НИОКР [267].

В рамках национального проекта будут поддержаны решения в области компьютерного моделирования и искусственного интеллекта. В своем выступлении на Форуме будущих технологий «Новые материалы и химия» Президент России обозначил ожидаемые эффекты от применения этих технологий в рассматриваемой сфере, а именно – сокращение срока разработки и внедрения новых материалов, сначала до 5–10 лет, а в перспективе – до 2–3 лет [17]. Имеющиеся разработки и планы развития данных технологических направлений также были представлены на форуме.

В настоящем обзоре государственных инициатив и мер поддержки рассмотрены примеры ряда стран (страны Европейского союза, США, Китай, Индия, Россия), обладающих существенным потенциалом в области материаловедения и технологий цифрового проектирования и моделирования, политика которых направлена в том числе и на развитие междисциплинарного направления – цифровое проектирование и моделирование материалов. Поддержка данного технологического направления осуществляется в рамках профильных инициатив (США, Китай) или имеющихся программ и мер стимулирования (Европейский союз, Индия, Россия), ориентированных преимущественно на научно-исследовательские центры и университеты.

В рамках обзора открытых источников по рассматриваемой тематике в странах БРИКС удалось выделить только 3 страны, осуществляющие поддержку исследований и разработок в области цифрового проектирования и моделирования материалов – Россия, Китай, Индия.

Поддерживаемые исследования направлены на создание материалов для применения в энергетике, биоматериалов, композиционных материалов, суперсплавов, конструкционных материалов. Разработка новых материалов сопровождается применением таких технологий, как высокопроизводительные вычисления, искусственный интеллект, в том числе машинное обучение и большие данные, которые достигли существенного уровня развития и способствуют созданию новых материалов в кратчайшие сроки.

Национальный и международный нормативно-технический ландшафт

В ходе анализа нормативно-технического ландшафта рассмотрены три направления исследований – отдельное направление цифрового проектирования и моделирования; отдельное направление новых материалов с фокусировкой на композиционных материалах; комплексное направление моделирования материалов, включая композиционные материалы, на стыке двух отдельных направлений.

Международный нормативно-технический ландшафт в области цифрового проектирования и моделирования и в области новых материалов, включая композиционные материалы, преимущественно регулируется:

- международными и региональными организациями, в числе которых
 - o Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO, ИСО);
 - o Международная электротехническая комиссия (International Electrotechnical Commission, IEC, МЭК);
 - o Европейский комитет по стандартизации (Comité Européen de Normalisation / European Committee for Standardization, CEN);

- национальными организациями по стандартизации, включая
 - о Британский институт стандартов (British Standards Institution, BSI);
 - о Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE);
 - о ASTM International (ранее – Американское общество испытаний и материалов, American Society for Testing and Materials, ASTM);
 - о Управление по стандартизации Китая (Guobiao Standards / Standardization Administration of China, GB, SAC).

Так, среди зарубежных национальных организаций рассмотрены организации по стандартизации США, Великобритании, а также особое внимание уделено странам, формирующим межгосударственное объединение БРИКС, в число которых входит Китай. Российский нормативно-технический ландшафт представлен результатами деятельности Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Подробный обзор стандартизации в области цифрового проектирования и моделирования представлен в экспертно-аналитическом докладе [6], в области новых материалов с фокусировкой на композиционных материалах – в экспертно-аналитическом докладе [7].

Международная организация по стандартизации (ИСО) совместно с Международной электротехнической комиссией (МЭК) проводят деятельность по разработке стандартов в области большого спектра технологий, к числу которых относится цифровое проектирование и моделирование.

В частности, совместный международный технический комитет ISO/IEC JTC 1 «Информационные технологии» (Information technology) разрабатывает международные стандарты в области информационных и коммуникационных технологий [268]. Технический комитет является разработчиком более 3000 стандартов. В техническом комитете отдельно сформированы подкомитеты по областям технологий, в частности ISO/IEC JTC 1/SC 7 «Программная и системная инженерия» (Software and systems engineering), ISO/IEC JTC 1/SC 32 «Управление данными и обмен ими» (Data management and interchange) [269; 270]. ISO/IEC JTC 1/SC 7 разработано и принято 222 стандарта и 45 стандартов, находятся в разработке по состоянию на начало 2025 года, в том числе совместно с другими международными организациями по стандартизации [270–272]. ISO/IEC JTC 1/SC 32 принято 110 стандартов и 18 стандартов, находятся в разработке.

В 2024 году были приняты новые стандарты и обновлены некоторые нормативно-технические документы ИСО и МЭК в области цифрового проектирования и моделирования, в частности, по вопросам требований к экологическим аспектам информационных активов [273], вопросам жизненного цикла [274–276], качества [277; 278], обмена данными [279] и др.

В области материалов международные организации по стандартизации также проводят значительную работу. В ИСО функционирует технический комитет ISO/TC 61 «Пластмассы» (Plastics), являющийся ключевым техническим комитетом в области полимерных материалов. Техническим комитетом по состоянию на начало 2025 года опубликовано 749 стандартов, 108 стандартов находится в разработке [280]. Стандарты технического комитета ISO/TC 61 посвящены вопросам методов испытаний пластмасс и определения их свойств, вопросам структуры и составных элементов, требованиям и техническим характеристикам, процессам изготовления, безопасности, экологическим аспектам и утилизации и др.

В рамках деятельности технического подкомитета ISO/TC 61/SC 9 «Термопластичные материалы» (Thermoplastic materials) проводится стандартизация в области формирования шаблонов спецификаций, методов испытаний и подготовки образцов термопластичных материалов, вторичного использования термопластичных материалов и изготовления изделий из них [281]. Техническим подкомитетом ISO/TC 61/SC 9 разработано 122 стандарта, в разработке находится 12 стандартов [282]. Техническим подкомитетом ISO/TC 61/SC 13 «Композиты и армирующие волокна» (Composites and reinforcement fibres) принято 110 стандартов и 21 стандарт находится в разработке [283].

Стандартизацию в области моделирования материалов ИСО и МЭК не ведут, уделяя внимание отдельным технологиям цифрового проектирования и моделирования, а также отдельно рассматривая аспекты новых материалов, преимущественно композиционных материалов.

В структуре *Европейского комитета по стандартизации (CEN)* создан технический комитет по регулированию технологий в области программного обеспечения и технологий цифрового проектирования и моделирования – CEN/TC 304 «Информационные и коммуникационные технологии. Требования по локализации» (Information and communications technologies – European localization requirements), в рамках деятельности которого проводится программная и аппаратная поддержка международных нормативно-технических документов для соответствия особенностям европейских стран [284]. Перечень разработанных техническим комитетом стандартов насчитывает 5 стандартов, последний из них разработан в 2011 году [285].

Европейский комитет по стандартизации (CEN) является одним из ключевых институтов по стандартизации в области новых материалов, особенно композиционных материалов. В перечне CEN приведено более 400 стандартов, регулирующих различные аспекты композиционных материалов, включая проектирование деталей из композитов и их применение в различных отраслях, методы проведения испытаний и оценки свойств материалов, создание древесно-полимерных композитов и композитов из натуральных волокон, требования к компонентам материала и др. В структуре CEN функционирует технический комитет CEN/TC 249 «Пластмассы» (Plastics) [286], которым разработано 504 стандарта и 83 стандарта, находятся в разработке [287].

Отдельно можно выделить деятельность технического комитета CEN/WS MODA «Терминология, классификация и метаданные в области моделирования материалов» (Materials modelling terminology, classification and metadata), который в 2018 году принял одноименный стандарт CWA 17284:2018 [288], направленный на упрощение обмена данными о результатах моделирования материалов с учетом законов физики между разными системами и разными структурными подразделениями.

Смежную деятельность ведет технический комитет CEN/WS NAN «Терминология и структурированная документация в области определения свойств и характеристик материалов» (Materials characterization – terminology and structured documentation), который в 2025 году обновил стандарт CWA 17815:2025 по вопросам концепций, метаданных и терминологии, формирующий основу для документирования свойств и характеристик материалов [289].

Другой технический комитет CEN/CLC/WS DEFACTO «Определение параметров, необходимых для моделирования материала, элементов и технологического процесса изготовления аккумуляторных батарей для автомобильного рынка» (Definition of parameters required for modelling of the material, cell and manufacturing process behaviour for battery cells for the automotive market) в 2023 году опубликовал 2 стандарта по вопросам перечня данных и методов получения данных для применения в целях моделирования материалов аккумуляторов для электромобилей [290].

Таким образом, CEN преимущественно сфокусирован на композиционных материалах, а также проводит некоторую регуляторную деятельность по направлению моделирования материалов, однако отсутствует системный, комплексный подход к стандартизации в данном направлении.

Среди нормативно-технических документов *Британского института стандартов (BSI)* в категории «Информационные технологии» приведено 8089 стандартов [291], при этом из них 625 стандартов относится к подкатегории «Программное обеспечение» [292]. В числе основных технических комитетов BSI в области программного обеспечения приведены:

- IST/15 «Разработка программного обеспечения и систем» (Software and systems engineering), предполагающий участие BSI в деятельности совместного технического подкомитета ISO/IEC JTC 1/SC 7, комитет опубликовал 202 стандарта и разрабатывает 84 стандарта [293];
- IST/5 «Языки программирования, их среды и системные программные интерфейсы» (Programming languages, their environments and system software interfaces), комитетом принято 74 стандарта и 21 стандарт находится в разработке [294];
- ICT/1 «Координация информационных систем» (Information systems co-ordination), комитетом опубликовано 177 стандартов и разрабатывается 49 стандартов [295];
- IST/33 «Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности» (Information security, cybersecurity and privacy protection), комитетом принято 55 стандартов и разрабатывается 79 стандартов [296].

Британский институт стандартов (BSI) также проводит стандартизацию в области новых материалов, в частности, BSI приводит 778 стандартов в области композиционных материалов, большая часть из них разработана BSI в рамках сотрудничества с ИСО, CEN, МЭК и другими организациями и адаптирована под специфику государства. Категория термопластичных материалов включает 360 стандартов [297]. В число основных технических комитетов BSI в области термопластичных материалов входят:

- PRI/82 «Термопластичные материалы» (Thermoplastic materials) [298], комитетом принято 140 стандартов и 28 стандартов находятся в разработке;
- PRI/89 «Пластмассы – Вопросы экологии» (Plastics – Environmental Aspects) [299], комитетом опубликовано 35 стандартов и 54 стандарта находятся в разработке;
- PRI/21 «Испытания пластмасс» (Testing of plastics) [300], комитетом принято 242 стандарта и разрабатывается 68 стандартов.

Вопросы моделирования материалов BSI не рассматривает.

Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) проводит деятельность по подготовке стандартов в рамках комитета S2ESC «Программная и системная инженерия» (IEEE Software & Systems Engineering Standards Committee) [301]. Так, IEEE совместно с ИСО и МЭК подготовили масштабную серию нормативно-технических документов в области разработки программного обеспечения и систем [302–305], серию стандартов по обеспечению управления жизненным циклом изделий, разрабатываемых с применением программного обеспечения [306; 307], и жизненным циклом инженерного программного обеспечения [308–317]. По направлению разработки программного обеспечения и систем технический комитет S2ESC принял 222 стандарта [318]. В области новых материалов, а также моделирования материалов IEEE не проводит системную деятельность.

ASTM International проводит регуляторную политику в области новых материалов с фокусировкой на композиционные материалы в рамках деятельности двух технических комитетов: D20 «Пластмассы» (Plastics) и D30 «Композиционные материалы» (Composite Materials). Технический комитет D20 содержит более 20 технических подкомитетов [319] и разработал 372 стандарта в области пластмасс, включая вопросы применения пластмасс, разработки и изготовления образцов, спецификации материалов, проведения механических, термических, оптических и других испытаний [320; 321]. Технический комитет D30 «Композиционные материалы» (Composite Materials) разработал 102 стандарта в данной сфере [322]. В области цифрового проектирования и моделирования, так же как в области моделирования материалов, ASTM не ведет системную деятельность.

Управление по стандартизации Китая (GB, SAC) проводит активную деятельность в направлении нормативно-технического регулирования технологий цифрового проектирования и моделирования. В частности, в Китае опубликованы стандарты по вопросам применения CAD-систем в электроэнергетике [323], основным терминам и требованиям к технической документации при применении CAD-систем [324], обмена данными при применении CAD- и CAM-систем [325], управления жизненным циклом продукта [326; 327], управления данными жизненного цикла продукта [328], применения предприятиями PDM-продуктов [329; 330], проведения конечно-элементного моделирования при применении CAE-систем для механических устройств [331], представления данных моделирования [332] и др. Суммарно в области программного обеспечения в КНР принято 228 стандартов.

Также в Китае опубликовано 124 национальных стандарта, содержащих вопросы применения новых материалов в различных отраслях промышленности, включая производство пластмасс, металлургию, химическую промышленность и др. [333] Отдельные стандарты посвящены методам проведения испытаний материалов, включая испытания на термостойкость, вязкость, растяжение, прочность и ударопрочность, неразрушающий контроль, физико-механические свойства и др. В КНР регулируются производство, испытания и применение полимерных композитов, как термоактивных, так и термопластичных, а также композитов с разным типом волокна. Вопросы моделирования материалов Управление по стандартизации Китая не рассматривает.

В Российской Федерации *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)* также проводит активную работу по формированию национального нормативно-технического ландшафта в области цифрового проектирования и моделирования, при этом накоплен значительный нормативно-технический задел [334].

Конкретные направления деятельности по развитию цифровых и информационных технологий курируются отдельными техническими комитетами, к числу которых относятся:

- ТК 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии» [335] (на базе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), комитет проводит подготовку и утверждение национальных стандартов, направленных на регулирование возможностей применения численного моделирования и проведения высокопроизводительных вычислений в различных отраслях промышленности. В рамках деятельности комитета ТК 700 подготовлены стандарты для моделирования физических процессов, моделирования течений жидкостей и газов, ударных взаимодействий, разработки высокотехнологичных промышленных изделий, моделирования динамических процессов социотехнических систем и др. [336; 337] Перечень действующих национальных стандартов, разработанных ТК 700, содержит 38 документов по состоянию на конец 2023 года;
- ТК-МТК-22 «Информационные технологии», который является «зеркальным» комитетом совместного технического комитета ISO/IEC JTC 1 и по состоянию на 2021 год разработал 185 стандартов [338; 339];
- ТК 165 «Системы автоматизированного проектирования электроники» (ООО «НИИ «АСОНИКА») [340], на начало 2025 года опубликовано 66 стандартов [341];
- ТК 482 «Поддержка жизненного цикла продукции», сформированный в 2021 году на базе нескольких ранее функционировавших комитетов. Структура объединенного комитета направлена на решение задач моделирования и технологий разработки продукции, управления жизненным циклом, а также интегрированной логистической поддержки [342]. По состоянию на начало 2025 года техническим комитетом опубликовано 86 стандартов [343];
- ТК 459 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий» [344; 345], по состоянию на конец 2022 года за техническим комитетом закреплено 319 стандартов.

В области стандартизации новых материалов, с фокусировкой на композиционных материалах, в России основную деятельность ведут:

- ТК 497 «Композиты, конструкции и изделия из них», по состоянию на 2017 год принято 307 стандартов [346];
- ТК 063 «Стеклопластики, стекловолокна и изделия из них», по состоянию на конец 2024 года за техническим комитетом закреплено 32 стандарта [347];
- ТК 230 «Пластмассы, полимерные материалы, методы их испытаний», технический комитет разработал 138 стандартов [348];
- ТК 182 «Аддитивные технологии», комитет разработал 50 стандартов [349].

Технический комитет по стандартизации ТК 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии» также осуществляет разработку стандартов в части моделирования свойств полимерных композиционных материалов. Так, разработаны национальные стандарты ГОСТ Р 57700.42–2023 «Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Общие положения» [350] и ГОСТ Р 57700.43–2023 «Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Верификация программного обеспечения» [351], которые

представляют собой полностью российскую разработку и не являются переводом англоязычных аналогов. Этот примечательный факт роднит стандарты [348, 349] с другой отечественной разработкой – ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [39]. Но большинство национальных стандартов в области композиционных материалов являются заимствованными, переведенными стандартами ИСО и CEN.

Кроме того, в Перспективном плане стандартизации в области передовых производственных технологий на 2025–2030 гг. (с изменением № 1, 2, 3) [352] приведены стандарты серии «Цифровой паспорт материала», планируемые к разработке в 2025–2028 гг.

По итогам анализа нормативно-технического регулирования в области цифрового проектирования и моделирования можно отметить, что организации ведут совместную работу, международный нормативно-технический ландшафт в области программного обеспечения находится на достаточно зрелом уровне. Основную деятельность по направлению цифрового проектирования и моделирования ведут Международная организация по стандартизации (ИСО), Британский институт стандартов (BSI), Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) и Управление по стандартизации Китая (GB) в рамках международного нормативно-технического ландшафта.

В Российской Федерации ведется планомерная работа по подготовке стандартов в области численного моделирования для применения в разных отраслях промышленности. Национальный нормативно-технический ландшафт представляет собой более практико-ориентированную и прикладную структуру в области технологий цифрового проектирования и моделирования в промышленности и также находится на высоком уровне зрелости, однако некоторые общесистемные направления стандартизации в области программного обеспечения требуют обновления.

В области новых материалов, включая композиционные материалы, ключевыми органами стандартизации выступают Международная организация по стандартизации (ИСО), Европейский комитет по стандартизации (CEN), ASTM International, Управление по стандартизации Китая (GB) в рамках международного нормативно-технического ландшафта и Росстандарт в рамках национального нормативно-технического ландшафта. Наблюдается, что стандартизация по направлению новых материалов сфокусирована преимущественно на композиционных материалах.

Деятельность Международной организации по стандартизации (ИСО) охватывает различные области стандартизации для разных видов пластмасс и композитов, главным образом, вопросы их испытаний и регулирование воздействия на окружающую среду. В свою очередь, Европейский комитет по стандартизации (CEN) координирует преимущественно прикладные аспекты отрасли композиционных материалов – испытания и дальнейшее применение композитов для ряда отраслей. ASTM International и GB работают в обоих направлениях и ориентированы в большей мере на узкоспециализированные вопросы разработки и применения композитов. Ключевая задача других зарубежных национальных органов стандартизации в сфере новых материалов, включая композиционные материалы, первоначально заключается в работе на международном уровне в целях создания гармонизированного нормативно-технического ландшафта. Национальный нормативно-технический ландшафт в области композиционных материалов представлен преимущественно заимствованными стандартами.

Таким образом, международный и национальный нормативно-технический ландшафт является зрелым в части отдельных технологий цифрового проектирования и моделирования и в части композиционных материалов, однако комплексная стандартизация и системная работа в области моделирования материалов, включая композиционные материалы, только начинает формироваться. Некоторую работу в данном направлении ведут CEN и Росстандарт.

Рисунок 15. Международный и национальный нормативно-технический ландшафт по направлению моделирования материалов

 Росстандарт 1221 стандарт				  Британский институт стандартов (BSI) 925 стандартов		  Европейский комитет по стандартизации (CEN) 509 стандартов	
TK 459 Информационная поддержка жизненного цикла изделий 319 стандартов		PRI/21 Испытания пластмасс (Testing of plastics) 242 стандарта		IST/15 Разработка программного обеспечения и систем (Software and systems engineering) 202 стандарта		CEN/TC 249 Пластмассы (Plastics) 504 стандарта	
TK 497 Композиты, конструкции и изделия из них 307 стандартов		ICT/1 Координация информационных систем (Information systems co-ordination) 177 стандартов		PRI/82 Термопластичные материалы (Thermoplastic materials) 140 стандартов		CEN/TC 304 Информационные и коммуникационные технологии. Требования по локализации (Information and communications technologies – European localization requirements) 5 стандартов	
TK-МТК-22 Информационные технологии 185 стандартов		IST/5* 74 стандарта		IST/33* 55 стандартов		  ASTM International (ранее – American Society for Testing and Materials) 474 стандарта	
TK 230 Пластмассы, полимерные материалы, методы их испытаний 138 стандартов		PRI/89* 35 стандартов		ISO/TC 61/SC 9* 122 стандарта		 Управление по стандартизации Китая (SAC) 352 стандарта	
TK 482 Поддержка жизненного цикла продукции 86 стандартов		Международная организация по стандартизации (ISO) 564 стандарта		ISO/TC 61/SC 13* 110 стандартов		D20 Пластмассы (Plastics) 372 стандарта	
TK 165* 66 стандартов		ISO/IEC JTC 1/SC 7* 222 стандарта		ISO/IEC JTC 1/SC 32* 110 стандартов		D30 Композиционные материалы (Composite Materials) 102 стандарта	
TK 182 Аддитивные технологии 50 стандартов		TK 700* 38 стандартов		  IEEE SA Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) 222 стандарта		 STANDARDS ASSOCIATION S2ESC* 222 стандарта	
TK 063* 32 стандарта							

* Наименования технических комитетов приведены ниже: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

- TK 165 Системы автоматизированного проектирования электроники
- TK 700 Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии
- TK 063 Стеклопластики, стекловолокна и изделия из них

Международная организация по стандартизации (ISO)

- ISO/IEC JTC 1/SC 7 Разработка программного обеспечения и систем (Software and systems engineering)
- ISO/TC 61/SC 9 Термопластичные материалы (Thermoplastic materials)
- ISO/TC 61/SC 13 Композиты и армирующие волокна (Composites and reinforcement fibres)
- ISO/IEC JTC 1/SC 32 Управление данными и обмен ими (Data management and interchange)

Британский институт стандартов (BSI)

- IST/5 Языки программирования, их среды и системные программные интерфейсы (Programming languages, their environments and system software interfaces)
- ST/33 Информационная безопасность, кибербезопасность и защита конфиденциальности (Information security, cybersecurity and privacy protection)
- PRI/89 Пластмассы – Вопросы экологии (Plastics – Environmental Aspects)

Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE)

- S2ESC Разработка стандартов в области программного обеспечения и систем (IEEE Software & Systems Engineering Standards Committee)

ГЛАВА 4. ОБЗОР НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В четвёртой главе исследованы подходы к формированию цифрового двойника (ЦД) материала, в том числе принципы разработки ЦД композиционного материала (далее – ЦДКМ), уровни моделирования материалов и подходы к их выделению, возможности существующих цифровых продуктов для моделирования свойств.

Подходы к формированию цифрового двойника материала

Разработка и выпуск высокотехнологичных продуктов, обладающих высококонкурентными или принципиально-новыми свойствами, требует применения новых материалов и технологических процессов. К современным перспективным материалам относятся композиционные материалы, мета-материалы и материалы аддитивных технологий, обеспечивающие возможность реализации требуемых характеристик изделий на всех этапах жизненного цикла. В настоящее время согласно задачам, закреплённым в Указе Президента Российской Федерации №309 от 7 мая 2024 года «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» [353] важным направлением технологического развития в стране является обеспечение технологической независимости по широкому спектру направлений, отвечающих приоритетам социально-экономического развития Российской Федерации. С этой целью запущены и реализуются национальные проекты по обеспечению технологического лидерства страны, определяющие превосходство технологий и (или) продукции по основным параметрам (функциональным, техническим, стоимостным) над зарубежными аналогами [354]. Одним из таких проектов является Национальный проект «Новые материалы и химия» [355], важным результатом которого должно стать достижение уровня технологической независимости по новым материалам и химии до 100 % к 2030 году. Разработка отечественных материалов является важной задачей достижения технологического суверенитета, определяющего 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 [354]. Однако, несмотря на это, в общемировой практике повышение технологичности и конкурентно-способности изделий связано в первую очередь с текущим уровнем понимания и описания поведения этих материалов в изделии и уровнем расчетного обоснования принимаемых решений, начиная с выбора материалов из функционально-применимого ряда.

С развитием компьютерных технологий современное расчетное обоснование новых изделий обеспечивается процессами цифрового проектирования, которые в свою очередь определяют новые подходы системного инжиниринга. Ключевой вехой развития системного инжиниринга изделий стала технология цифровых двойников (ЦД), единое определение которой впервые закреплено на федеральном уровне в Национальном стандарте Российской Федерации серии «Численное моделирование» – ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения» [39]. Документ является полностью отечественной разработкой, сфокусированный на разработке новых изделий с помощью технологии цифровых двойников, а не оцифровке производственной инфраструктуры и логистики.

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 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям. Следовательно, материал в составе изделия с точки зрения технологии ЦД и приведенным определениям, как неотъемлемая часть изделия с заданной технологией, является его «составной частью» и может рассматриваться в узком смысле как одна из моделей изделия. При этом, в широком смысле, материал может быть описан собственной цифровой моделью с необходимой и достаточной проработанностью для применения во всех изделиях, изготовленных из этого материала с применением различных технологических процессов. Таким образом, помимо сущности ЦД изделия может быть определена сущность цифровой двойник материала (ЦД материала), для которой справедлив аналогичный подход к разработке на разных этапах жизненного цикла, процессам верификации и валидации и построению двусторонних связей.

В рамках данного раздела моделирование материалов (materials modeling) рассматривается как объединение математического, компьютерного и цифрового моделирования и проектирования с материаловедением, которое предполагает создание и применение материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками, в том числе композиционных материалов [7]. На сегодняшний день единый подход к формированию ЦД материала в явном виде не существует, однако, в соответствии с мировой практикой (например, [356–364] и др.) предпосылки к его появлению довольно однозначны. Подход к формированию цифрового двойника материала может быть определён в ходе решения следующих ключевых задачи:

- задача разработки универсальной архитектуры цифрового двойника материала (становление единого подхода к определению цифрового двойник материала);
- многоуровневое математическое и компьютерное моделирование материалов «материал–структура–свойство»;
- решения прямых и обратных задач моделирования физико–механических свойств;
- задачи учета влияния технологического процесса;
- задачи математического и компьютерного моделирования поведения изделий и конструкций из разнообразных материалов на эксплуатационные воздействия.

Данные задачи, помимо физического эксперимента, требуют применения методов математического и компьютерного моделирования как для его описания, так и для его разработки в целях совершенствования экспериментальных методик и получения более представительных данных о материале. Для программной реализации как отдельных задач подхода, так и их методологической связи в целях достижения необходимой и достаточной концепции цифровой модели материала и, как следствие, ЦД материала, помимо широкого класса специализированных вычислительных программных решений, также требуется высокопроизводительная программная среда, позволяющая управлять всеми данными, ресурсами и расчетными цепочками.

Следовательно, появляется еще больший спектр задач, связанный с разработкой отечественного программного обеспечения (далее – ПО) и определения требований к программным продуктам для обеспечения возможности создания ЦД материала как отдельной цифровой модели, так и компьютерной модели ЦД изделия (ЦД материала для ЦД изделия/-ий).

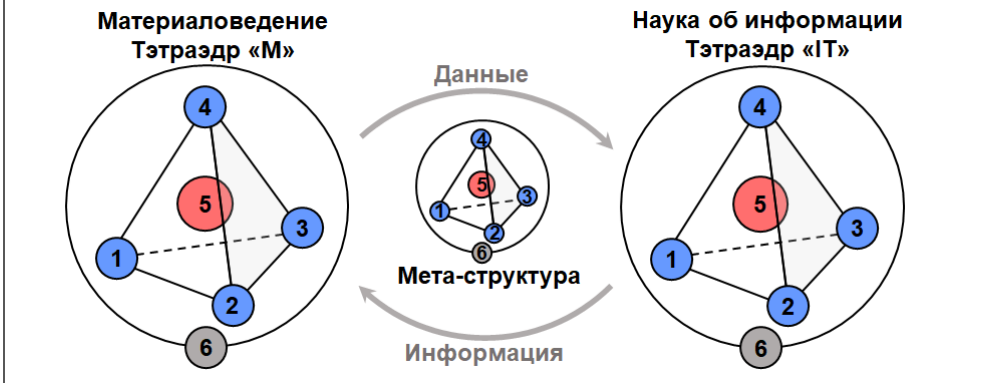
Независимо от типа материала (моно-материал, композиционный материал, материал для аддитивных технологий) подход к разработке ЦД материала должен быть единым и универсальным. Целесообразно рассматривать становление подхода на примере «сложных» микронеоднородных анизотропных материалов, например, композиционных материалов ввиду их ключевой особенности: материал, конструкция и технология неделимы и представляют собой одно целое. Это будет также справедливо для мономатериалов с понижением уровня сложности на определенных этапах описания их поведения и не противоречиво при уходе в более глубокие уровни моделирования ввиду того, что мономатериалов являются, в том числе, потенциальными компонентами композиционных материалов. Для материалов аддитивных технологий (3D-печать) подход к разработке ЦД композиционных материалов также справедлив ввиду принадлежности класса этих материалов к аддитивным методам и сохранения той же ключевой особенности парадигмы «материал-конструкция-технология».

4.1. Подходы к определению цифрового двойника материала (ЦД материала)

Одновременно с тенденциями к определению подхода к формированию ЦД материала, также появляются первые определения, справедливые к определенным практикам и наработкам в различных областях, где вопросы, связанные с цифровым материаловедением, приводят к необходимости появления данной сущности. В таблице 2 представлены результаты некоторых исследований, относящихся к определению термина ЦД материала.

Таблица 2. Подходы к определению термина «цифровой двойник материала»

№	Подход	
1	Источник, год	Concept for databased material property description along the process chain press hardening: Implementing the Digital Material Twin and the Digital Material Shadow [364] Год: 2025
	Организация	IEHK Steel Institute of RWTH Aachen University, Германия
	Описание	В исследовании представлены две концепции цифрового описания материалов: цифровой двойник материала (Digital Material Twin, DMT) и цифровая тень материала (Digital Material Shadow, DMS). DMT описывает состояние материала, предоставляя его внутренние свойства, которые не зависят от свойств конечного компонента, с использованием подходов многоуровневого описания с помощью экспериментальных и имитационных наборов данных. DMS в свою очередь позволяет анализировать поведение материала в процессе производства по данным датчиков и сообщает информацию DMT. DMT может быть расширен до eDMT (extended DMT) путем включения набора данных параметров этапов обработки, описывая цепочку технологического процесса, каждое звено которой является DMT.
	Примечания	Авторы работы рассмотрели применение подхода для металлов в цикле конкретной технологической цепочки.

№	Подход	
2	Источник, год	The materials tetrahedron has a «digital twin» [356] Год: 2022
	Организация	Department of Mechanical Engineering, The University of Vermont, США
	В исследовании предлагается внедрение концепции «цифрового двойника» в классическую структуру тетраэдра материала, представляющую сложившуюся суть материаловедения для инженерных расчетов («технологический процесс-структура-свойства- применение»), с целью определения области вычислительных и информационных инструментов структуры «материал-информационный двойник» (materials-information twin tetrahedra, MITT). В результате концепция состоит из тетраэдра материала («М») и тетраэдра информационного двойника («ИТ»), обеспечивающих связь данных и информации посредством мета-структуры (Рисунок 16). Рисунок 16. Пояснения к подходу MITT и мета-структуре  Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ по материалам [356], 2025 В соответствии с рисунком 16, получаются следующие области формирования подхода к определению цифрового двойника материала {тетраэдр материалов} – [мета-структура] – {тетраэдр информационного двойника}: 1 – {технологический процесс (processing – процедуры синтеза, формирования или сборки материалов)} – [Действия (Activities)] – {Методы/рабочие процессы (Methods/workflows – процедуры получения, интеграции или анализа оцифрованной информации}; 2 – {Структура/состав (Structure/composition – химический состав, микроструктура, дефекты и т. д.)} – [Расположение (Arrangement)] – {Представления (Representations – структуры данных, онтологии, пространственно-временные изображения, модели, визуализации данных и т. д.}; 3 – {свойства (Properties – наблюдаемые/измеримые характеристики, используемые для описания материала} – [Качества (Qualities)] – {Атрибуты (Attributes – пропускная способность*, точность, неопределенность, сложность, смещение, требования к программному обеспечению и оборудованию и т. д.}; 4 – {Соответствие области применения (Performance/Application – способность системы материалов соответствовать заданному набору требований к применению)} – [Применимость (Applicability) информационной системы] – {Эффективность информационной системы (Efficacy – насколько хорошо выбранный набор цифровых инструментов может взаимодействовать с реальным миром};	

№	Подход	
		5 – {Характеристики и стандарты описания (Characterization – стандартные методики описания и количественной оценки поведения материалов} – [Проверка (Validation)] – {Способы оценки (Evaluation/Benchmarks – стандартные методики сравнения различных систем по критериям, разработанным сообществом}; 6 – {Устойчивость/критичность (Sustainability/criticality – целостный взгляд на роль и жизненный цикл материалов в антропосфере} – {Жизнеспособность (Viability)} – {Принципы FAIR-данных (FAIR data principles – Набор руководящих принципов управления данными: находимость, доступность, совместимость, возможность повторного использования}.
	Примечания	* Throughput – в данном контексте – количество данных/характеристик, проходящих через систему или процесс.
3	Источник, год	Официальный сайт организации [357]
	Организация	Helmholtz-Zentrum Hereon — междисциплинарный исследовательский центр Объединения немецких научно-исследовательских центров имени Гельмгольца, некоммерческий научно-исследовательский институт. Ключевые единицы – Joint Lab Virtual Materials Design (JL VMD), Платформа Helmholtz для моделирования материалов
	Описание	Цифровые двойники материалов — это комплексные виртуальные модели, которые, в частности, охватывают внутренние процессы, а также взаимодействие материалов с окружающей средой, например, во время обработки или в полевых условиях.
	Примечания	В Hereon цифровые двойники используются для разработки материалов и интерпретации экспериментов применительно к металлическим биоматериалам, нанопористым металлам, системам хранения водорода и др.
4	Источник, год	Guidance for Materials 4.0 to interact with a digital twin [358] Год: 2022
	Организация	Department of Materials Science and Engineering, The University of Sheffield, Department of Materials, University of Manchester and Henry Royce Institute, Великобритания
	Описание	В исследовании рассматриваются различия между «производственным цифровым двойником» (“manufacturing DT”) и «цифровым двойником компонента» (“component DT”); первое является начальным граничным условием последнего. Приводятся этапы того, как определить структуру вокруг разработки цифрового двойника с точки зрения материалов. Авторы предлагают, чтобы цифровой двойник компонента включал слой материалов, состоящий из подслоев обработки, микроструктуры и механических свойств, содержащих данные, эквивалентные тем, которые можно получить при разрушающем исследовании физического двойника в любой точке во время производства и эксплуатации.
	Примечания	-
5	Источник, год	Статья: Digital Twins for Materials [359] Год: 2022
	Организация	Georgia Institute of Technology, США Center for Integrated Nanotechnologies, Sandia National Laboratories, США
	Описание	В исследовании утверждается, что сам материал можно рассматривать как сложную многомасштабную физическую систему, форма (т. е. детали структуры материала в иерархии длины материала) и функция (т. е. реакция на внешние стимулы, обычно характеризующиеся посредством соответствующим образом определенных свойств материала) могут быть надлежащим образом зафиксированы в цифровом двойнике, который может представлять эволюцию структуры, процесса и производительности материала с течением времени, как с учетом истории процесса, так и среды эксплуатации.
	Примечания	-

№	Подход	
6	Источник, год	Официальный сайт организации [360]
	Организация	Pro Labour, Словения
	Описание	Цифровой двойник материала по сути является подробным контролем массового расхода и контролем химического состава в цифровой форме. Он формирует основу для более полного технологического цифрового двойника, который также включает все важные технологические параметры.
	Примечания	-
7	Источник, год	Digital-Twin-Enhanced Quality Prediction for the Composite Materials [361] Год: 2023
	Организация	Beihang University, Tsinghua University, Китай
	Описание	Цифровой двойник (DT) предлагается как технология улучшения и прогнозирования качества композиционного материала. DT прогнозирует состояние/поведение материалов с помощью виртуальных (цифровых) моделей с учётом процесса полимеризации, анализирует остаточное напряженно-деформированное состояние, используя обширные данные, полученные в ходе эксплуатации. Применение технологии используется для повышения качества продукции путем мониторинга состояния, получения соответствующих данных для принятия производственных решений.
	Примечания	-
8	Источник, год	Digital Twins in Graphene' Technology [362] Год: 2023
	Организация	Российский университет дружбы народов, Москва
	Описание	В исследовании цифровые двойники представляют набор молекулярных моделей, не противоречащих природе объекта и позволяющих выполнять квантово-химические расчеты с установлением равновесной структуры проектируемых материалов с применением данной технологии ЦД (в т.ч. получение их спектров ИК-поглощения и комбинационного рассеяния, обусловленных 3N колебательными модами).
	Примечания	-
9	Источник, год	Официальный сайт организации [363] Год: 2024
	Организация	Государственная корпорация Росатом Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов (ВНИИНМ) им. Бочвара, Москва
	Описание	Под цифровым двойником принимается набор цифровых расчетных моделей с некоторой библиотекой свойств материалов. Моделями являются узлы и элементы тепловыделяющей сборки. С данными моделями проводятся виртуальные механические испытания для определения свойств.
	Примечания	Применяется для численного моделирования поведения тепловыделяющего элемента с композитной оболочкой.

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ по открытым источникам, 2025

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о существовании двух основных типов задач или потребностей, которые обуславливают потребность в разработке ЦД материала. Каждый из типов задач актуален для разработки изделия с целью обеспечения конкурентоспособности продукта (материала и изделия) на рынке:

- [А] ЦД материала для решения задач разработки изделий.
- [Б] ЦД материала для решения задачи создания новых материалов с заданными физико-механическими свойствами.

Традиционный итерационный подход [90] достижения требуемых свойств материалов и изделия и последовательность этапов их разработки представляется как:

- Разработка или использование материала (M) $\rightarrow$ разработка технологии изготовления материала (T_1) и разработка технологии производства изделия (T_2) с применением разработанного и созданного материала $\rightarrow$ разработка изделия или конструкции (K), которая интегрирует материалы в систему или подсистемы изделия $\rightarrow$ вывод изделия/ продукта (P) на рынок (см. формулу (1)).
- $$M \rightarrow T_1, T_2 \rightarrow K \rightarrow P \quad (1)$$

Подход с применением концепций «Цифровой двойник материала» – «Цифровой двойник изделия» обеспечит создание и реализацию современного подхода – обратного подхода, основанного на иной последовательности этапов создания материалов и/ или разработки изделия:

- Требования, предъявляемые к изделию и продукту (P^*) на рынке $\rightarrow$ разработка изделия или конструкции (K^*), на основе балансировки матрицы M_K требований, целевых показателей и выполнения ресурсных ограничений [5] $\rightarrow$ разработка технологических процессов производства изделия (T_2^*) и изготовления материалов (T_1^*) $\rightarrow$ разработка нового или использование существующего материала (M^*), который имеет физико-механические характеристики, необходимые для обеспечения конкурентоспособности изделия и продукта (P^*) на рынке.

Каждый этап приведенной последовательности сопровождается применением N-алгоритмов компьютерной оптимизации (Computer-Aided Optimization, CAO), позволяющих оптимизировать и значительно улучшать конструкцию, технологические процессы и материалы, включая их микроструктуру. Это позволяет трансформировать традиционный подход, основанный на «доведении» материала для достижения требуемых свойств через испытания, в современный подход (см. формулу (2)), в процессе которого, кроме технологий компьютерной оптимизации осуществляются балансировки матриц требований, целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, стоимостных, технологических, производственных, экологических, нормативных и т.д.) для материала M_M , технологий M_T и конструкции M_K , [5] :

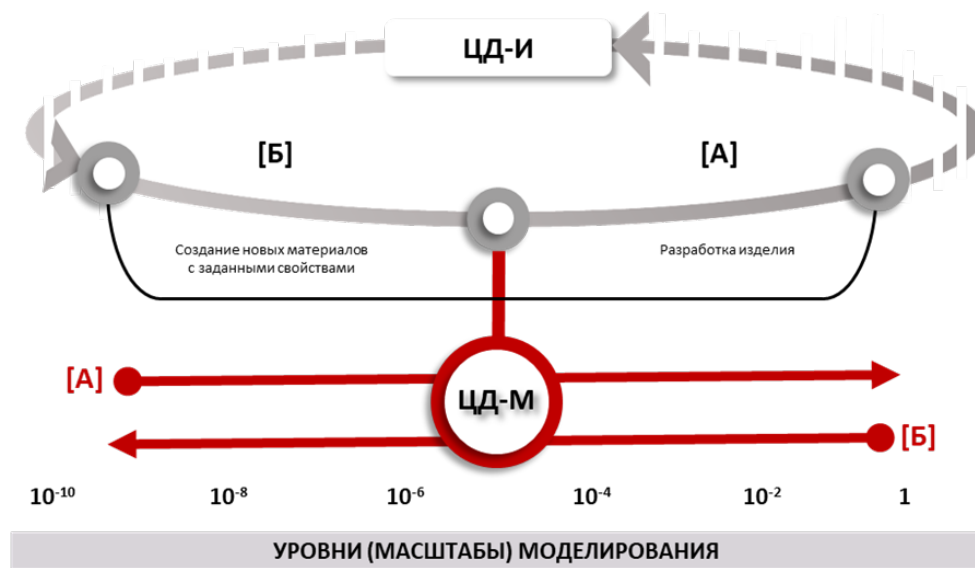
$$P^* = \text{Opt}^{(N)}(K, T_1, T_2, M, \dots) \{ \approx M_M, \approx M_T, \approx M_K \} = K^*, T_1^*, T_2^*, M^* \quad (2)$$

Источник: Digital engineering in shipbuilding [90], 2024

где $\approx M_M, \approx M_T, \approx M_K$ – сбалансированные матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [5]. Результатом применения компьютерных технологий оптимизации к конструкции, технологиям и материалам выступает оптимизированный вариант конструкции, оптимизированные технологии изготовления конструкции и материала, а также инновационный материал, обеспечивающие балансировку матриц требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, и в итоге – создание конкурентоспособных изделий, отвечающих требованиям мирового уровня [90].

Таким образом, достижение требуемых свойств одновременно для материалов и изделия в ходе решения задач [А] и [Б] с применением систем «Цифровой двойник материала» – «Цифровой двойник изделия» можно представить в виде условной схемы на рисунке 17.

Рисунок 17. Схема решения задач [А] и [Б] на основе совместного применения технологий «Цифровой двойник материала» – «Цифровой двойник изделия»



Примечание: [А] ЦД материала для решения задач разработки изделия, [Б] ЦД материала для решения задачи создания новых материалов с заданными свойствами,

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ по материалам [5; 39; 65; 350; 351; 365–368], 2025

Таким образом, решение задачи [А] для ЦД изделия является традиционным итерационным процессом, а с добавлением задачи [Б] — появляются возможности формирования требуемых свойств материала с последующим определением закономерностей их получения или выбора относительно получаемых данных с ЦД изделия для обеспечения существования более оптимального состояния системы «материал-изделие», что соответствует современному направлению развития.

4.2. Подходы к моделированию материалов

Необходимость математического и компьютерного моделирования свойств материалов и интеграция разрабатываемых методов и методик в технологию цифровых двойников обусловлена уже упомянутым современным подходом достижения требуемых свойств материалов и изделия [369] и требует рассмотрения задач на различных уровнях (масштабах) моделирования, а также объединение этих уровней посредством решения задач типа [А] и задач типа [Б]:

- моделирование свойств для решения задач разработки изделия (задача А);
- моделирование свойств для задачи создания новых материалов с заданными свойствами (задача Б);

В общем смысле — подходы к компьютерной реализации концепции многомасштабного моделирования, позволяют осуществлять построение цифровых моделей в соответствии с [39] для решения задач определения свойств конкретных объектов. В дальнейшем эти системы математических и компьютерных моделей, формирующих цифровые модели, используются для практического решения обратной задачи поиска материалов с заданными свойствами. Общая схема построения программной реализации — двухэтапная.

На первом этапе (этап декомпозиции объекта) осуществляется многомасштабная декомпозиция исследуемого объекта, в результате получается иерархическая структура, задающая логику построения программной реализации многомасштабной цифровой модели. Само построение или синтез цифровой модели осуществляется на втором этапе (этап композиции) путем восхождения по уровням, относящимся к разным масштабам моделирования.

4.2.1. Задачи гомогенизации и гетерогенизации (локализации) в многомасштабном моделировании свойств композиционных материалов

Прямая задача многомасштабного моделирования заключается в определении набора физико-механических свойств заданного объекта. При решении прямых задач из области материаловедения, в качестве фазовых переменных, как правило, выступают координаты атомов или дискретных элементов, а их изменение определяется законами динамики или минимизацией потенциальной энергии системы. Такая ситуация характерна для квантово-механических расчетов кристаллических структур, молекулярно-динамического и дискретного моделирования. В ряде задач, где требуется итерационное согласование параметров, итерационный процесс может быть представлен как динамический в пространстве итерируемых параметров [370].

Обратная задача многомасштабного моделирования заключается в идентификации или определении микросвойств компонентов материала по макросвойствам всего материала в целом.

Задача гомогенизации – прямая задача многомасштабного моделирования, процесс μ -уровень $\rightarrow$ m -уровень $\rightarrow$ M -уровень – заключается в определении полного набора макроскопических («эффективных») физико-механических свойств на m -уровне с целью исследования на M -уровне изделий, композитных конструкций или композитных структур, составными частями которых могут выступать микронеоднородные КМ, задаваемые на μ -уровне.

Разработка методов гомогенизации, методов определения эффективных физико-механических характеристик, является актуальной проблемой механики композиционных материалов. Решению этой важной задачи механики микронеоднородных КМ посвящено много работ [8; 9; 365; 367; 368], а также ряд работ, представленных в Приложении 2 [П2-2, П2-6, П2-22, П2-23, П2-31, П2-35, П2-36, П2-41, П2-65, П2-82, П2-91, П2-118, П2-124, П2-125, П2-128, П2-132]

Задача гомогенизации для микронеоднородного композиционного материала представляет собой серию задач на мезоуровне для представительного элемента объема (ПЭО, Representative Volume Element, RVE) или для ячейки периодичности для периодических КМ. Вычисленные на основе микрополей (температур, перемещений, деформаций, напряжений и др.), возникающих в микронеоднородном КМ с учетом реальной микроструктуры, эффективные макроскопические характеристики микронеоднородного КМ используются для решения задач на макроуровне для изделий или конструкций, включая композитные конструкции / композитные структуры.

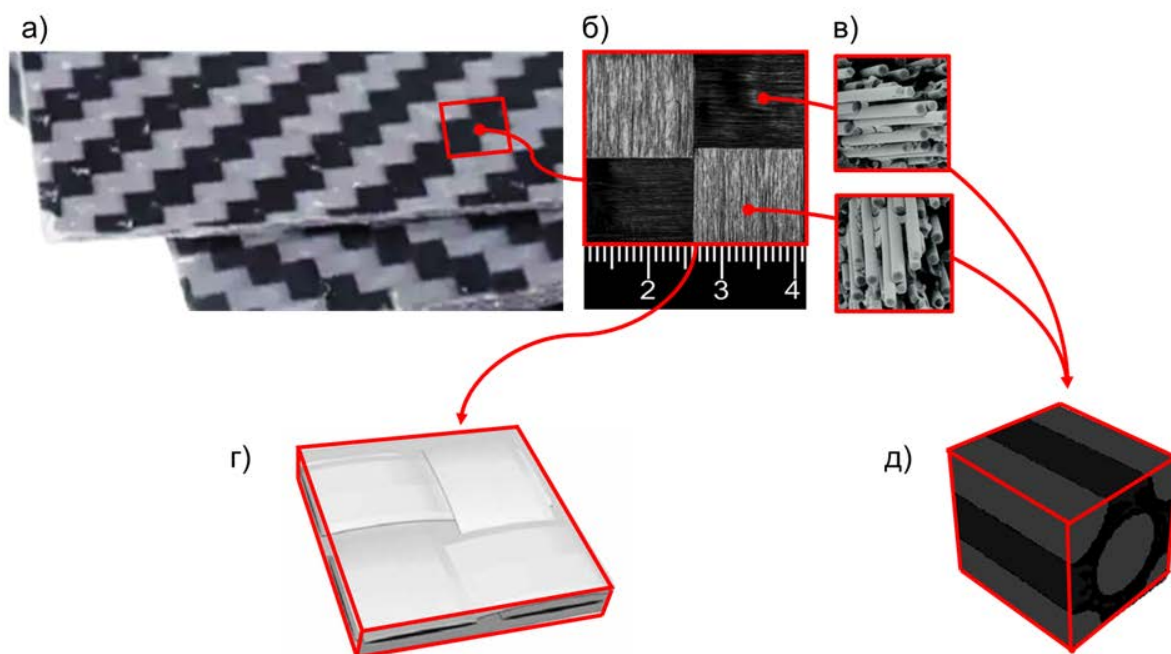
Задача гетерогенизации (локализации), процесс M -уровень $\rightarrow$ m -уровень $\rightarrow$ μ -уровень – определение локальных полей на микроуровне (микрополей), например, микронапряжений в представительном элементе объема (ПЭО, REV) микронеоднородного композиционного материала с целью последующего анализа микромеханического поведения отдельных компонентов и границ их

сопряжения на микроуровне (для волокнистых КМ характерные размеры на микроуровне – диаметры волокон, расстояния между волокнами и др.).

Рассмотрим пример в многомасштабного моделирования для тканевого полимерного композиционного материала (Рисунок 18, а), состоящего из трех уровней (масштабов) описания (рисунок 18, б, в, г, д). Методики определения свойств на разных уровнях моделирования этого материала, а также обобщение методов гомогенизации описаны в работе [19]. В данном случае прямой задачей будет определение свойств материала на мезо-уровне, по результатам моделирования и гомогенизации ячейки периодичности микроуровня с использованием свойств отдельных волокон и матрицы с учетом микроструктуры ячейки периодичности.

А «сопряженной» задачей будет определение численных характеристик физико-механических свойств отдельных волокон и матрицы и геометрической (технологической) конфигураций мезо-уровня (например, размеры систем нитей и их синусоидальный закон распределения) и микро-уровня (например, диаметр волокон и процент их содержания в материале) таким образом, чтобы свойства системы на мезо-уровне достигали заданных значений. При этом требования к требуемым значениям могут прийти с более высокого уровня (уровня изделия на макроуровне). Напомним, что представительный элемент объема или ячейка периодичности на мезоуровне необходимы для реализации процедуры гомогенизации с целью определения эффективных физико-механических свойств материальной точки сплошной гомогенизированной среды.

Рисунок 18. Двухуровневая структура тканевого композиционного материала



Примечание:

- а) – представление о материале;
- б) – 1-й уровень, образованный двумя семействами нитей и полимерной матрицей;
- в) – 2-й уровень, образованный моноволокнами в семействах нитей и полимерной матрицей;
- г) и д) – геометрические модели ячеек периодичности на мезо и микроуровнях.

4.2.2. Уровни моделирования материалов, подходы к выделению уровней

Выделение уровней моделирования для различных материалов является задачей декомпозиции многомасштабной модели определенного класса материалов. Итоговое количество уровней зависит от класса и подкласса материала, однако, в общем случае выделяется 4 уровня моделирования, обусловленные масштабом рассматриваемой области:

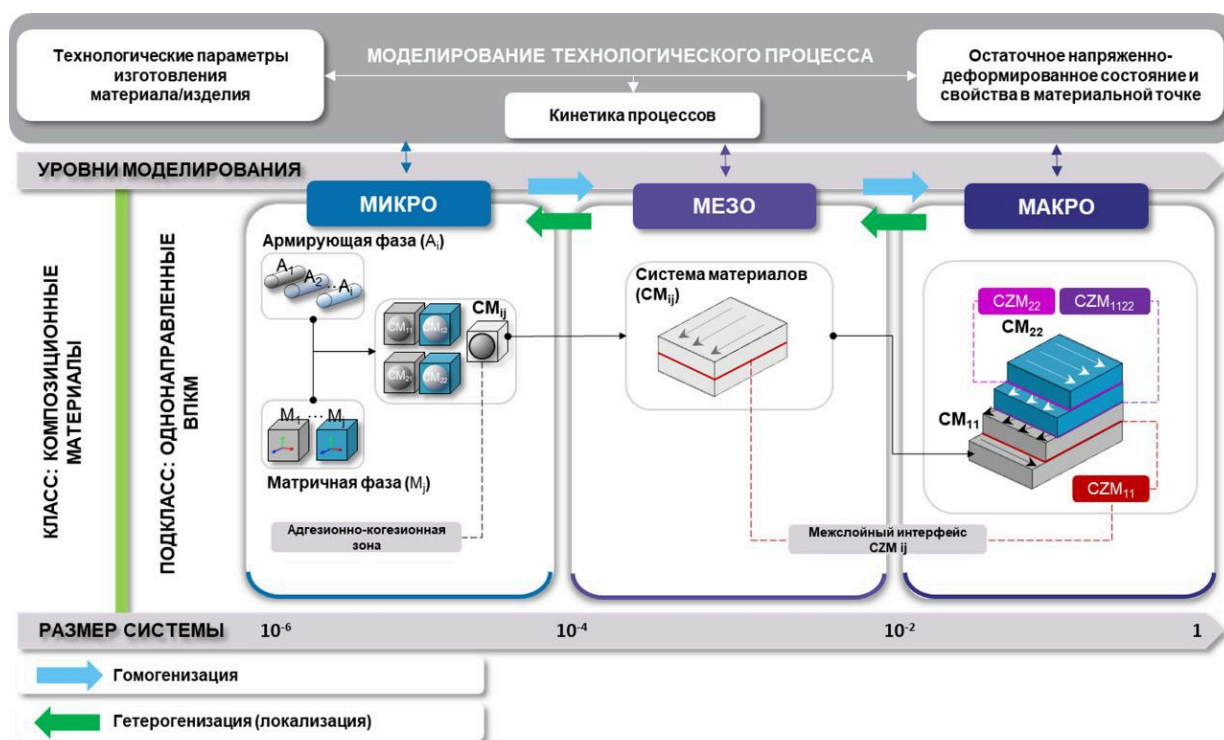
- атомарный или молекулярный уровень;
- микроуровень;
- мезоуровень;
- макроуровень.

Моделирование свойств на атомарном или молекулярном уровне как правило чаще используется для описания зависимости свойств моно-материалов от химического состава и структуры. Описание свойств композиционных материалов, состоящих из нескольких мономатериалов по определению, начинается с микроуровня, на котором физико-механические свойства компонентов известны. Для получения данных о материалах в различных масштабах исследуемой области используются инструменты математического и компьютерного **моделирования** и **физический эксперимент**. Примеры используемых **инструментов моделирования** включают в себя теорию функционала плотности (Density Functional Theory, DFT), молекулярную динамику (Molecular Dynamics, MD), ускоренную [371] молекулярную динамику (Accelerated Molecular Dynamics, AMD), динамику дислокаций (Dislocation Dynamics, DD), кинетический метод Монте-Карло (Kinetic Monte Carlo, kMC), конечно-элементное моделирование пластичности кристаллов (Crystal Plasticity Finite Element Method, CPFEM), FEM и расширенный FEM (xFEM). Примеры используемых методов и **инструментов физического эксперимента** включают в себя атомно-силовую микроскопию (Atomic Force Microscopy, AFM), просвечивающую микроскопию высокого разрешения (High-Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM), in situ TEM, томографию, сканирующую электронную микроскопию (Scanning Electron Microscopy, SEM), дифракцию обратно рассеянных электронов (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) и механические испытания [372].

На Рисунке 19 представлен пример концепции уровней многомасштабного моделирования для класса композиционных материалов, в частности подкласса однонаправленных волокнистых полимерных композиционных материалов (далее – ВПКМ). Далее в разделе будут рассматриваться примеры уровней относительно данного класса материалов.

Несмотря на то, что атомарный или молекулярный уровень моделирования свойств для рассматриваемого класса материалов на практике обычно не включается в единый процесс многомасштабного моделирования, изучение свойств компонентов системы материалов, а также свойства системы в масштабах атомарного и молекулярного взаимодействия может быть необходимым, например, в случае, если в качестве материала матрицы применяются нано-композиты (изотропные материалы, с включением функциональных нано-частиц).

Рисунок 19. Концепция уровней многомасштабного моделирования



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ по материалам [365–368; 370; 371; 373–377], 2025

Например, для нано-композитов и полимерных материалов, компьютерное моделирование используется для решения следующих фундаментальных проблем в исследованиях [371]:

- кинетики реакции и ее зависимости от изменений температуры во время формирования (полимеризации) материала;
- структуры, ее свойств и динамики;
- поведения полимера при добавлении наночастиц и его реологических изменений для оптимизации параметров технологического процесса;
- способов армирования полимеров наночастицами.

Также подходы данного уровня помогают в решении задач получения характеристик границы раздела фаз. С использованием подходов моделирования свойств на нано-атомарном или молекулярном уровне возможно предсказывать и анализировать свойства, которые невозможно оценить в таких масштабах в ходе физического эксперимента, а также, при решении обратных задач, возможно определение конкретных «формул» веществ, являющихся компонентами систем материалов нано-, атомарного или молекулярного уровня.

Микроуровень

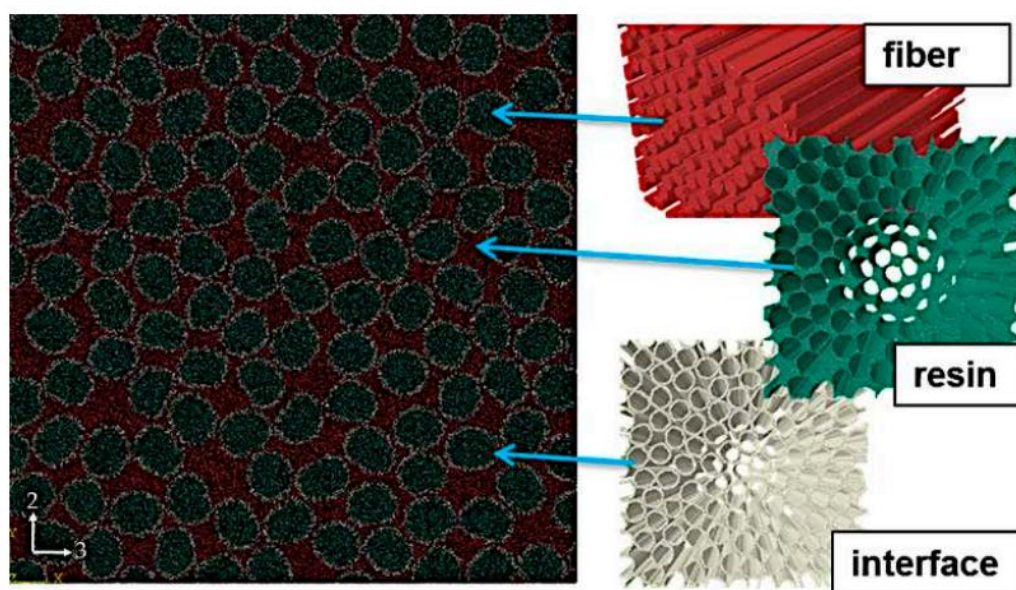
На микроуровне для композиционных материалов объектом моделирования является микроструктура многофазной гетерогенной среды (системы материалов) в масштабе, сопоставимым с размерами армирующей фазы (например, для волокнистых композиционных материалов – масштаб отдельных волокон, их диаметр или расстояния между соседними волокнами).

Основными методами математического и компьютерного моделирования свойств являются методы микромеханики микронеоднородных материалов с последующей гомогенизацией. Исходные данные для получения представления о микроструктуре и последующего ее моделирования получаются, как правило, с помощью микрокомпьютерной рентгеновской томографии (микро-КТ, microCT). Результатами работы систем микро-КТ является получение качественных изображений структуры материала и минимизации «шумов» и артефактов. По этим данным строятся конечно-элементные модели микроструктуры с применением различных программ или посредством разработки пользовательских алгоритмов построения. На Рисунке 20 приведен пример построения модели по данным микроструктуры, с выделением трех фаз:

- волокна;
- интерфейс (интерфаза или адгезионно-когезионная зона);
- матрица (связующее, смола/ полимер), заполняющая оставшийся объем.

Микромеханическое поведение на микроуровне описывается с использованием представительного элемента объема (Representative Volume Element, RVE), а глобальное поведение изделия на макроуровне моделируется с использованием метода гомогенизации для RVE [374] или ячейки периодичности для периодического КМ. Статистическое представление микроструктуры оценивается путем увеличения размера RVE до тех пор, пока не произойдет стабилизация гомогенизированных свойств, что, фактически, представляет практическую сходимость эффективных физико-механических характеристик), соответственно, пока не будет получен статистический объемный элемент (Statistical Volume Element, SVE). Чувствительность гомогенизированных физико-механических свойств к изменениям в свойствах отдельных компонентов, т.е. в свойствах волокон и матрицы, анализируется с целью оценки важности отдельных входных параметров, поскольку не все из них обязательно хорошо известны.

Рисунок 20. Представление трехфазной микроструктуры: алгоритмически разделенные волокна (fiber), интерфейс (interface), добавленный к периметру волокон, и смола (resin), заполняющая остальную часть



Вычислительная микромеханика для композиционных материалов используется для прогнозирования эффективных физико-механических свойств материала из свойств компонентов (например, для волокнистых полимерных композиционных материалов – волокна, матрица и интерфейс между ними), вместе с объемной долей и пространственным распределением волокон в пределах отдельного слоя. Термомеханические свойства волокна (модули Юнга / модули упругости, коэффициенты Пуассона, пределы текучести или пределы прочности, а также коэффициенты теплопроводности и коэффициенты линейного теплового расширения) обычно представляются производителем волокна. Однако свойства матрицы и интерфейса зависят от процесса консолидации (время, давление и температура, а также эффект дисперсии волокна), и их необходимо характеризовать с применением подходов физического эксперимента и моделирования нано-, атомарного или молекулярного уровня.

Механический отклик композиционного материала получается с помощью конечно-элементного анализа представительного элемента объема (RVE) микроструктуры. Основной механизм деформирования и повреждений, экспериментально наблюдаемые в компонентах, вводятся в процесс моделирования элементами интерфейса (для моделирования декогезии интерфейса) или соответствующих моделей для учета пластической деформации или разрушения (как правило, микрорастрескивания) матрицы и моделей поведения волокон. Эта стратегия используется для прогнозирования местоположения разрушения однонаправленных слоев, подвергаемых различным условиям нагрузки в плоскости и вне плоскости [375]. Подходы вычислительной микромеханики также применяются для определения сопротивления разрушению материала [32; 33].

Помимо моделирования термомеханических свойств системы материала, возможно применять вычислительную микромеханику для моделирования процессов полимеризации [379], для последующего определения и анализа остаточного технологического напряженно-деформированного состояния, сопровождающегося остаточными температурными деформациями и химической усадкой (в случае полимерных матриц). Как правило, все подходы основаны на многомасштабном моделировании, например, в исследовании [380] остаточные напряжения микроотверждения композитов из термореактивного полимера, армированного углеродным волокном, оцениваются с использованием метода многомасштабного моделирования – модель термохимической связи разрабатывается на более высоком уровне для получения распределений температуры и степени отверждения. Между тем, на микромасштабном уровне формируется RVE-модель на мезоуровне, с помощью которой определяются остаточные напряжения отверждения. Эволюция остаточных напряжений отверждения позволяет описать механизм взаимодействия волокна, матрицы и межфазного периода в процессе отверждения.

Кроме применения «продвинутых» RVE-моделей, на практике для расчета эффективных свойств КМ применяются и некоторые аналитические модели микромеханики:

1. Правило смесей (Rule of Mixture «ROM») и модифицированное правило смесей (Modified Rule of Mixture «MROM») [381; 382];
2. Модель Халпина – Цая (Halpin-Tsai model) [383];
3. Модель Чамиса (Chamis model) [384];
4. Модель Хашина – Розена и Кристенсена (Hashin-Rosen-Christensen model) [385; 386];

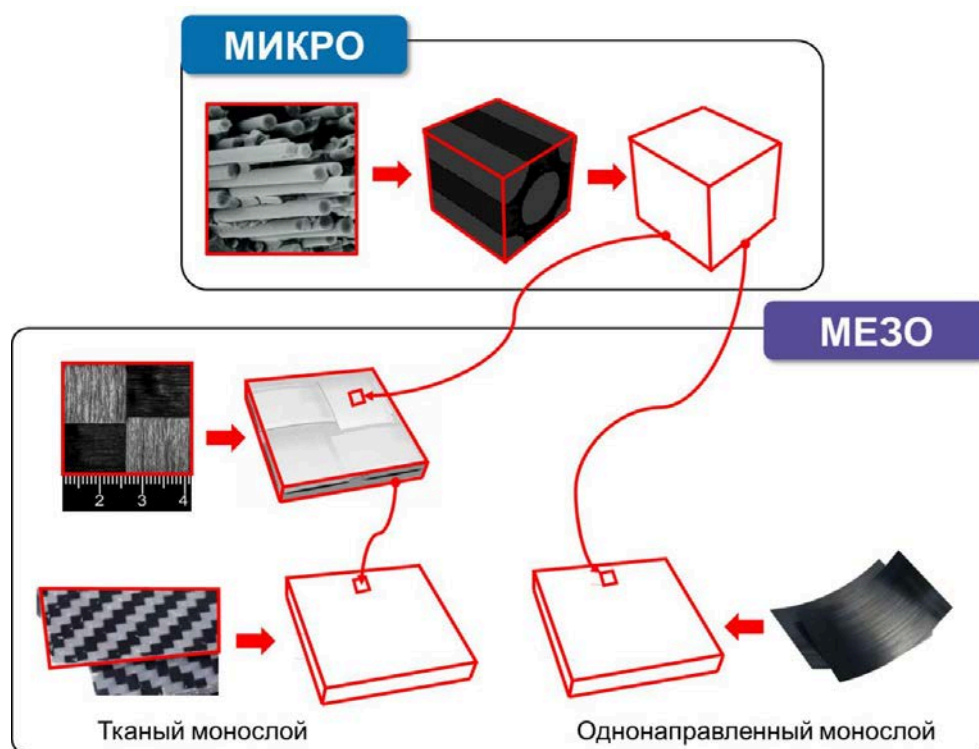
5. Модель Мори – Танака (Mori-Tanaka model) [387];
6. Мостиковая модель (Bridging model) [388].

Их применение обусловлено простотой реализации и низкой ресурсоемкостью расчета, тогда как сложные подходы с RVE требуют не только качественных данных о представлении микроструктур, но и больших вычислительных ресурсов.

Мезоуровень

Мезоуровень для волокнистых композиционных материалов представляет собой общую структуру слоя, и не всегда может быть выделен в явном виде ввиду особенности самой структуры. Например, для однонаправленных ВПКМ, эффективные характеристики определяются для представительного элемента объема или ячейки периодичности и являются характеристиками мезоуровня, тогда как для текстильных (тканых) ВПКМ, мезоуровень существует в явном виде (Рисунок 21).

Рисунок 21. Представление о мезоуровне на примере ВПКМ



Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ, 2025

Как правило на данном уровне происходит финальная гомогенизация, которая, как уже отмечалось, может быть многоуровневой, также на данном уровне определяются эффективные (макроскопические) физико-механические характеристики макроскопически анизотропного материала для возможности применения методов механики сплошных сред и проведения расчетов в конечно-элементной постановке с применением многослойных оболочечных или твердотельных элементов. Для ВПКМ на данном уровне возможно описание эффективных физико-механических свойств в плоскости слоя, а также включение в анализ математических и компьютерных моделей межслойного интерфейса для анализа возможных расслоений (delaminations).

Для определения физико-механических свойств компонентов и композиционных материалов используются стандартные экспериментальные методы определения свойств на образцах материала, это означает, что именно на этом уровне уже возможна верификация и валидация методов математического и компьютерного моделирования и математических и компьютерных моделей композиционных материалов. Стандартными методами испытаний можно также получить данные о влиянии эксплуатационных нагрузок и воздействии внешней среды на свойства материала.

Макроуровень

На макроуровне, характерном для изделия или его частей, в случае с ВПКМ рассматривается некая слоистая структура, как правило, многослойная, образованная слоями с различной ориентацией однонаправленных волокон, возможно даже из различных ВПКМ. Эффективные физико-механические свойства каждого слоя описывают гомогенизированные модели мезоуровня, а связь слоев может быть описана моделями межслойного интерфейса. Многоуровневые процессы гомогенизации позволяют определить эффективные физико-механические свойства волокнисто-слоистой структуры. С точки зрения эксперимента для валидации математических и компьютерных моделей материалов, могут применяться экспериментальные методики для конструктивно-подобных образцов, позволяющие установить закономерности процесса разрушения и выявить более точные критерии разрушения на данном уровне для решения прямой задачи уже в изделии или выявить причины того или иного поведения материала, спускаясь на более низкие уровни.

4.3. Возможности существующих цифровых продуктов для моделирования материалов

Использование при проектировании и моделировании новых композитных конструкций и материалов автоматизированных систем различных классов CAD/ CAE/ CAM достаточно широко распространено на передовых предприятиях. Ключевую роль в рассматриваемой области играют системы компьютерного моделирования и инженерного анализа (CAE), развитие которых осуществляется более полувека. На сегодняшний день самыми используемыми программами по части разработки методик моделирования материалов являются зарубежные продукты, представленные в Таблице 4, где приведена оценка возможности математического и компьютерного моделирования свойств и технологии для полимерных композиционных материалов в соответствии с выделенными уровнями моделирования для класса ВПКМ. Под технологией здесь понимаются, в первую очередь, процессы полимеризации.

Таблица 3. Оценка возможности математического и компьютерного моделирования свойств и технологии для полимерных композиционных материалов в соответствии с выделенными уровнями моделирования для класса ВПКМ

№	ПО	МИКРО	МЕЗО	МАКРО
		Технология/ Свойства	Технология/ Свойства	Технология/ Свойства
1	Ansys Material Designer	-/+*	-/+	-/-
2	Ansys Cure Cycle Simulation	-/-	+/-	+/-
3	Ansys Composite Prepost	-/-	-/+	-/+
4	Ansys LS-Dyna	(+/*)**	+/+	+/+

№	ПО	МИКРО	МЕЗО	МАКРО
		Технология/ Свойства	Технология/ Свойства	Технология/ Свойства
5	ABAQUS	(+/-)**	+/+	+/+
6	Digimat (MSC Software)	-/+*	-/+	-/+
7	Simcenter 3D	-/+	-/+	-/+
Примечание: * – встроенные решения с RVE ** – моделирование возможно, но встроенных решений нет				

Источник: Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ по открытым источникам, 2025

Среди отечественных CAE-систем для моделирования материалов с использованием метода конечных элементов с заделом на моделирование ВПКМ можно выделить: APM WinMachine (ООО «НТЦ «АПМ»), Логос (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), CAE-Fidesys (ООО «Фидесис»), в том числе отраслевые, например, Лира [38].

Для класса материалов ВПКМ с использованием существующих коммерческих программных продуктов моделирование, в основном, начинается с микроуровня, и основными свойствами к математическому и компьютерному моделированию выступают термомеханические и механические свойства компонентов КМ с использованием базовых, статических и линейных моделей. При разработке методик учета нелинейного поведения микро- и макро- неоднородных анизотропных материалов с учетом технологии изготовления, остаточной прочности, усталости, ползучести, трещинообразования и других откликов на эксплуатационные воздействия для последующего моделирования изделий в контексте многомасштабного моделирования свойств материалов необходимо разрабатывать пользовательские математические модели материалов для описания механики сплошных сред для мезо- и макро- уровней, что позволяют сделать, например, Ansys LS-Dyna и ABAQUS.

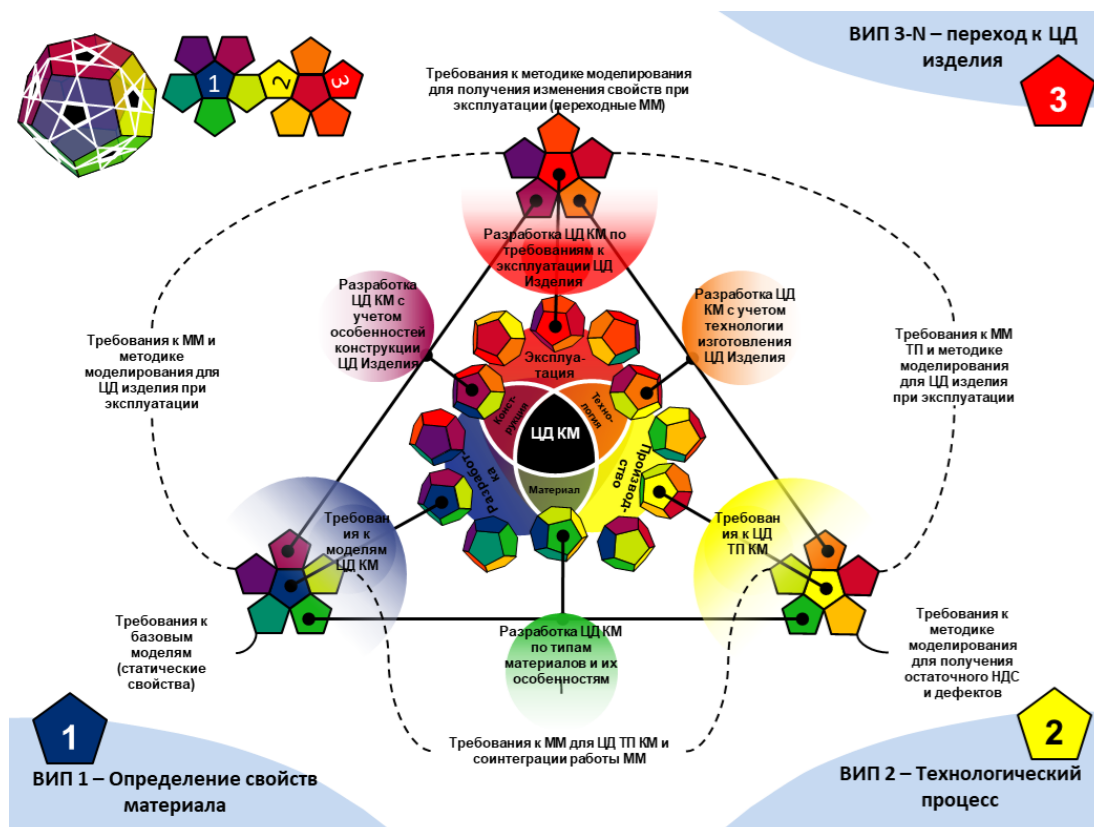
Таким образом, на сегодняшний день, не существует всеобъемлющего ПО для обеспечения возможности решения прямых и обратных задач моделирования свойств материалов с учетом технологии изготовления и отклика на режимы эксплуатации. Однако, при решении задач многоуровневого математического и компьютерного моделирования свойств композиционных материалов, как правило, в мировом научном сообществе приходят к использованию того или иного передового ПО компьютерного моделирования и к разработке своих собственных подпрограмм и алгоритмов расчета и анализа свойств материалов.

Для обеспечения последовательности и взаимосвязи отдельных моделей материала на различных уровнях с последующим развитием этих моделей и формированием полноценного цифрового двойника материала, способного интегрироваться с цифровым двойником изделия для решения глобальных задач достижения конкурентоспособности продукции (как материала, так и изделия), и, как следствие, технологического суверенитета и технологического лидерства страны, необходимы также системы класса SPDM. SPDM системы – Simulation Processes and Data Management, системы управления расчетными данными и процессами расчетных обоснований. Одной из передовых российских SPDM-систем служит цифровая платформа для разработки и применения цифровых двойников CML-Bench®.

Благодаря высококачественной реализации CML-Bench® как платформенного решения, ее применение выходит за рамки традиционной SPDM-системы и, фактически, CML-Bench® представляет собой цифровую платформу по разработке и применению цифровых двойников высокотехнологичных изделий, материалов и физико-механических / технологических процессов, эксплуатационных режимов и специализированных бизнес-процессов, например, цифровой сертификации [389].

Отечественный подход [90] базируется именно на разработках цифрового двойника материала для цифрового двойника изделия. Подход апробирован на композиционных материалах, в частности ВПКМ. Особенность изделий из КМ характеризует классическая парадигма: «материал-технология-конструкция» неделимы и представляют собой одно целое. Для обеспечения связи парадигмы «материал-технология-конструкция» при использовании современных методов проектирования изделия из КМ по технологии цифровых двойников (ЦД) согласно ГОСТ Р 57700.37 [39] и для разработок расчетных методик необходима разработка ЦД материала, способного воспроизводить методологически, технически и физически свойства ЦД изделия (далее ЦДИ). Следовательно, ЦД-КМ должен отвечать сути и терминологии ГОСТ Р 57700.37: выделяется ЦД-КМ на этапе разработки, на этапе производства и на этапе эксплуатации. В результате, ЦДКМ для ЦДИ может быть описан слиянием двух парадигм (триад): «Материал-Технология-Конструкция» и «Разработка-Производство-Эксплуатация» (представлено на Рисунке 22).

Рисунок 22. Слияние двух парадигм (триад): «Материал-Технология-Конструкция» и «Разработка-Производство-Эксплуатация» на примере разработки цифровых моделей композиционных материалов (ЦМКМ)



Каждое пересечение определяет набор требований, удовлетворение которых означает достижение высокой степени адекватности цифровых моделей композиционных материалов (ЦМКМ) в составе ЦДИ, процессы верификации и валидации которых должны быть обеспечены посредством разработки цифровых (виртуальных) испытательных стендов и полигонов (ВИС и ВИП).

Технология цифровых двойников – передовая технология, которая заключается в обобщении подходов разработки и создания цифровых двойников материалов, не только для более точного описания жизненного цикла изделия в парадигме его цифрового двойника при решении прямой задачи, а также для решения задач глобальной оптимизации и изделия, и применяемых материалов, и технологических процессов материалов и изделий из них. С развитием и становлением технологии системы «цифровой двойник изделия» – «цифровой двойник материала» возможна и новая веха развития технологии – цифровая сертификация⁶ с применением цифровых двойников.

⁶ 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, сертификационных и прочих испытаний (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли РФ и внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 6 июня 2020 г. N 1512-р (с изменениями и дополнениями)).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ИГРОКОВ РЫНКА ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 4. Сегментация основных игроков рынка цифрового проектирования и моделирования материалов

Название компании, страна	Программное обеспечение моделирования свойств материала			Программное обеспечение моделирования технологических процессов изготовления композиционных материалов и изделий из них
	Моделирование материала (Modeling)		Информатика материала (Informatics)	
	Дискретное моделирование (Discrete) Микро- и мезо-уровни	Моделирование сплошной среды (Continuum) Макроуровень		
Зарубежные решения				
Altair Engineering (входит в Siemens Digital Industries Software) (США)	-	✓	✓	-
Ansys (входит в Synopsys) (США)	-	✓	✓	-
Autodesk (США)	-	✓	✓	-
Cadence Design Systems (США)	✓	✓	-	-
COMSOL (Швеция)	-	✓	✓	-
Dassault Systèmes (Франция)	✓	✓	✓	✓
ESI Group (входит в Keysight Technologies) (Франция)	-	✓	-	✓
Hexagon AB (Швеция)	✓	✓	✓	✓
JSol Corporation (входит в NTT DATA Japan Corporation и The Japan Research Institute, Limited) (Япония)	✓	✓	✓	✓
Siemens Digital Industries Software (США)	✓	✓	-	✓
Synopsys (США)	✓	✓	-	-
Schrödinger (США)	✓	-	✓	-
Fujitsu (Япония)	✓	-	✓	-
Phaseshift Technologies (Канада)	✓	-	✓	-
Materials Zone (Израиль)	-	-	✓	-

Название компании, страна	Программное обеспечение моделирования свойств материала			Программное обеспечение моделирования технологических процессов изготовления композиционных материалов и изделий из них
	Моделирование материала (Modeling)		Информатика материала (Informatics)	
	Дискретное моделирование (Discrete) Микро- и мезо-уровни	Моделирование сплошной среды (Continuum) Макроуровень		
Kebotix (США)	-	-	✓	-
Al Materia (Канада)	-	-	✓	-
Total Materia (Швейцария)	-	-	✓	-
Citrine Informatics (США)	-	-	✓	-
CoreTech System Co., Ltd. (Китай), разработчик Moldex3D [392; 393]	-	-	✓	✓
Toray Group (Япония), разработчик 3D TIMON™ [394]	-	-	-	✓
MTorres (Испания)	-	-	-	✓
Отечественные решения				
ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ» (входит в Госкорпорацию «Росатом»)	-	✓	-	-
Научно-образовательный центр «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» (НОЦ «СИМПЛЕКС») МГТУ им. Н.Э. Баумана	✓	✓	-	✓
ООО «ФИДЕСИС» (компания НТИ)	-	✓	-	-
Научно-технический центр «АПМ» (НТЦ «АПМ») (компания НТИ)	-	✓	-	-
ООО «ТЕСИС» (компания НТИ)	-	✓	-	-
ООО Научно-производственное объединение «Программируемые композиты»	-	✓	-	-

Название компании, страна	Программное обеспечение моделирования свойств материала			Программное обеспечение моделирования технологических процессов изготовления композиционных материалов и изделий из них
	Моделирование материала (Modeling)		Информатика материала (Informatics)	
	Дискретное моделирование (Discrete) Микро- и мезо-уровни	Моделирование сплошной среды (Continuum) Макроуровень		
(ООО НПО «ПК») (компания НТИ)				
ООО «АНТАРИЯ» [395]	-	-	✓	-

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам открытых источников [2; 3; 20; 21; 89–92] и официальных сайтов компаний, 2025

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

1. 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.
2. 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)
3. 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.
4. 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).
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Novozhilov Yu.V., Mikhaliuk 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
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

23. Боровков А.И., Алеман Меца Д. Гомогенизация однонаправленных волокнистых и гранулированных упругих композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд. СПбГПУ. 2009. № 3. 135 – 153.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Mikhaluk 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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
35. 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.

36. 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.
37. 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
38. 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
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. Borovkov A., Misnik Yu., Grodinskaya E.G., Kondratiev S.V., Mikhaluk 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.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
 50. 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.
 51. 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.
 52. Borovkov A., Avdeev I., Artemyev A. Refined Finite Element Modelling of Laminated Beams // *Abstr. Annual GAMM Conf. Metz. France*. 1999. P.37.
 53. Borovkov A. Finite Element Multiscale Homogenization and Sequential Heterogenization of Composite Structures // *Abstr. Annual GAMM Conf. Metz. France*. 1999. P.37.
 54. 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.
 55. 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 // *Preprints 3rd Int. Workshop "Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering" (NDTCS'99)*. St.Petersburg. Russia. 1999. H12-H13.
 56. 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.
 57. 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.
 58. 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.
 59. 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.
 60. 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.

61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. 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.
72. Borovkov A., Palmov V. Locality Principle in Mechanics of Composite Structures // Abstr. Annual GAMM Conf. Bremen. Germany. 1998. P.18.

73. 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.
74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. 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.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. 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.
85. 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.
86. 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.

87. 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.
88. 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.
89. 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.
90. 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.
91. 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.
92. 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
93. 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.
94. 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.
95. Borovkov A.I. Finite Element Macro- and Micromechanics of the Complex Composite Structures // Abstr. 3rd EUROMECH Solid Mechanics Conf. Stockholm. Sweden. 1997. P.57.
96. 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.
97. 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.
98. Borovkov A.I., Nikulina L., Shiryaev 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.
99. 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.
100. Боровков А.И., Щукин 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.

101. 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.
102. 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.
103. 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.
104. 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.
105. 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.
106. 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.
107. 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.
108. 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.
109. 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.
110. Borovkov A.I., Nikulina L.V., Shiryayev P.M. Computational Mechanics of Macro- and Microheterogeneous Composite Structures // Abstr. IX Int. Conf. on Mechanics of Composite Materials. Riga. Latvia. 1995. P.158.
111. 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.
112. 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.
113. 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.

114. 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.
115. 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.
116. Borovkov A.I. Computational Mechanics of Composite Structures // Abstr. Annual Scientific Conf. GAMM'94. Braunschweig. Germany. 1994. P.64.
117. 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.
118. 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.
119. 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.
120. 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
121. 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.
122. 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.
123. 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.
124. Боровков А.И., Елисеев В.В. Определение эффективных физико-механических свойств композиционных материалов // Труды ЛПИ. № 425. "Механика и процессы управления". 1988. 65-70.
125. Боровков А.И. Эффективные физико-механические свойства волокнистых композитов. - М.: Изд-во ВИНТИ. 1985. - 113 с.
126. 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.
127. 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.

128. Боровков А.И., Елисеев В.В. Определение эффективных физико-механических свойств композиционных материалов // Труды ЛПИ. № 425. "Механика и процессы управления". 1988. 65-70.
129. 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.
130. 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.
131. 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.
132. Боровков А.И. Эффективные физико-механические свойства волокнистых композитов - М.: Изд-во ВИНТИ. 1985. - 113 с.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем автоматизированного проектирования (CAD-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 214 с.
2. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа (CAE-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 228 с.
3. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем управления оборудованием с числовым программным управлением (CAM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 188 с.
4. Боровков А. И., Рождественский О. И., Павлова Е. И. Функциональные характеристики отечественных систем управления жизненным циклом изделия (PLM-систем). Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на март 2024 года): монография. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 174 с.
5. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, К. В. Кукушкин, А. А. Гамзикова; ред. А. И. Боровков. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/01/29/2023_1129_Монография_ЦД_в_высокотехнологичной_промышленности_Small.pdf (дата обращения: 22.07.2024)
6. Тренды и сценарии развития рынков, относящихся к "цифровой фабрике" по направлению "Технет" НТИ в условиях новой экономической реальности. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/06/30/ead_crim.pdf (дата обращения: 23.02.2025)
7. 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. Кобышно, Е. В. Бобрынина; ред. А. И. Боровков. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 184 с. – URL: <https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/06/28/otchety/perspectivy-i-scenarii-razv-materialov.pdf> (дата обращения: 21.01.2025)
8. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах: Математические задачи механики композиционных материалов. Наука, 1984. – 352 с. – URL: <http://elcat.lib.misis.ru/vmsua5379ghkip/index.php?url=/notices/index/IdNotice:92036/Source:default> (дата обращения: 06.06.2025)
9. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
10. Вычислительная механика деформируемого твердого тела. Задачи теплопроводности и упругости: учебное пособие / А. И. Боровков, О.В. Антонова, В.Л. Леонтьев, А.А. Михайлов, А.С. Немов Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – 162 с.
11. Scotti L., Basoalto H., Moffat J., Cogswell D. Review of Material Modeling and Digitalization in Industry: Barriers and Perspectives // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2023.

- Issue 12. – P. 397-420. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40192-023-00318-2> (дата обращения: 01.03.2025)
12. Economic impact of materials modelling – Materials Modelling. – URL: <https://materialsmodelling.com/economic-impact-of-materials-modelling/> (дата обращения: 01.03.2025)
 13. The Economic Impact of Materials Modelling. – URL: <https://zenodo.org/records/44780> (дата обращения: 01.03.2025)
 14. Новые материалы для технологической независимости. – URL: <https://stimul.online/articles/sreda/novye-materialy-dlya-tekhnologicheskoy-nezavisimosti/> (дата обращения: 01.03.2025)
 15. Композиционные и гибридные материалы для высокотехнологичных отраслей экономики – Новости технологий и инноваций. – URL: <https://future-forum.tech/news//kompozitsionnye-i-gibridnye-materialy-dlya-vysokotekhnologichnykh-otrasley-ekonomiki/> (дата обращения: 01.03.2025)
 16. Стандартизация, квалификация и допуск новых материалов для сложных технических систем – Новости технологий и инноваций. – URL: <https://future-forum.tech/news//standartizatsiya-kvalifikatsiya-i-dopusk-novykh-materialov-dlya-slozhnykh-tekhnicheskikh-sistem/> (дата обращения: 01.03.2025)
 17. Пленарное заседание Форума будущих технологий. – URL: <https://future-forum.tech/news/Plenarnoye-zasedaniye-Foruma-budushchikh-tekhnologiy/> (дата обращения: 03.04.2025)
 18. Материалы нового века. – URL: <https://atomvestnik.ru/2023/03/30/materialy-novogo-veka/> (дата обращения: 01.03.2025)
 19. ОСК представила инновационные решения в области композиционных материалов на Форуме будущих технологий – Медиапалуба. – URL: <https://paluba.media/news/188373> (дата обращения: 01.03.2025)
 20. Materials Modelling Software Market – Materials Modelling. – URL: <https://materialsmodelling.com/materials-modelling-software-market/> (дата обращения: 01.03.2025)
 21. Materials Modelling and Informatics Software Market. – URL: <https://zenodo.org/records/8101869> (дата обращения: 28.05.2025)
 22. Materials Informatics 2022-2032: IDTechEx. – URL: <https://www.idtechex.com/en/research-report/materials-informatics-2022-2032/840> (дата обращения: 02.03.2025)
 23. Wang J., Wesselmecking S., Krupp U., Ackermann M. Data Guided Materials Processing – Digital Material Twin and Digital Material Shadow // Authorea. – 2022. – P. 1-12. – URL: <https://www.authorea.com/users/473682/articles/563818-data-guided-materials-processing-digital-material-twin-and-digital-material-shadow?commit=8102d4d6fe89eddc116f88a313ac8f6a4964fd0> (дата обращения: 02.03.2025)
 24. Strategic Analysis of an Industry // AnalystPrep. – URL: <https://analystprep.com/cfa-level-1-exam/equity/strategic-analysis-industry/> (дата обращения: 03.02.2025)
 25. Тренды и сценарии развития рынка авиационных двигателей, включая двигатели беспилотных летательных аппаратов, в 2023 году. Экспертно-аналитический доклад : монография / А. И.

- Боровков, Е. Р. Мартынец, Л. А. Щербина, Н. И. Прытков, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин; ред. А. И. Боровков. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 204 с. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2024/01/29/2023_1229_ЭАД.pdf (дата обращения: 21.01.2025)
26. Kimmig J., Zechel S., Schubert U. Digital Transformation in Materials Science: A Paradigm Change in Material's Development // *Advanced Materials*. – 2021. – Issue 33. – P. 1–9. – URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202004940> (дата обращения: 02.03.2025)
 27. Onyeka U., Samuel B. Challenges and Opportunities of Artificial Intelligence on Composite Material Engineering // *Journal of Sustainable Materials Processing and Management*. – 2024. – Vol. 4. – Issue 2. – P. 61–76. – URL: <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/jsmpm/article/view/18750/6835> (дата обращения: 02.03.2025)
 28. Trends in the advancement of material science – *Electronics360*. – URL: <https://electronics360.globalspec.com/article/21514/trends-in-the-advancement-of-material-science> (дата обращения: 02.03.2025)
 29. Цифровое материаловедение: новые свойства для новой реальности – *Новости технологий и инноваций*. – URL: <https://future-forum.tech/news/tsifrovoye-materialovedenie-novye-svoystva-dlya-novoy-realnosti/> (дата обращения: 02.03.2025)
 30. Paraye P., Sarviya R. Advances in polymer composites, manufacturing, recycling, and sustainable practices // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. – 2024. – Vol. 63. – Issue 11. – P. 1474–1497. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/25740881.2024.2339295> (дата обращения: 02.03.2025)
 31. Что такое квантовые вычисления – *Microsoft Azure*. – URL: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-quantum-computing> (дата обращения: 02.03.2025)
 32. How Quantum Computers Are Accelerating Materials Science Discoveries. – URL: <https://quantumzeitgeist.com/how-quantum-computers-are-accelerating-materials-science-discoveries/> (дата обращения: 02.03.2025)
 33. Аналитический доклад "Квантовые вычисления для новых материалов" – 2025. – URL: https://sberlabs.com/static/files/1003/RU/аналитический_доклад_Квантовые_вычисления_для_новых_материалов.pdf (дата обращения: 02.03.2025)
 34. 5 Tech Trends Accelerating Advanced Materials Design in 2021 – *Machine Design*. – URL: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21155824/5-tech-trends-accelerating-advanced-materials-design-in-2021> (дата обращения: 02.03.2025)
 35. "Nanostitches" enable lighter and tougher composite materials – *MIT News – Massachusetts Institute of Technology*. – URL: <https://news.mit.edu/2024/nanostitches-enable-lighter-and-tougher-composite-materials-0416> (дата обращения: 02.03.2025)
 36. Advanced Composite Materials for Structure Strengthening and Resilience Improvement / X. Huang, S. Su, Z. Xu, Q. Miao, W. Li, L. Wang // *Buildings*. – 2023. – Issue 13(10). – URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/10/2406> (дата обращения: 02.03.2025)
 37. Business Models and Sustainability for Materials Modelling Software. – URL: <https://zenodo.org/records/2541723> (дата обращения: 02.03.2025)

38. Соколов А.П., Першин А.Ю. Система автоматизированного проектирования композиционных материалов. Часть 1. Концепции, архитектура и платформа разработки // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – Вып. 8-9. – С. 72-83. – URL: https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-8-9_2020-72-83.pdf (дата обращения: 03.03.2025)
39. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения – docs.cntd.ru. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 15.11.2023)
40. What Is a Composite Digital Twin and How This Technology Works. – URL: <https://www.challenge.org/insights/composite-digital-twin/> (дата обращения: 03.03.2025)
41. Kalidindi S., Buzzy M., Boyce B., Dingreville R. Digital Twins for Materials // Frontiers in Materials. – 2022. – Issue 9. – P. 1-15. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2022.818535/full> (дата обращения: 03.03.2025)
42. Jurczyk T. Complex Modelling Platform based on Digital Material Representation // Complex Systems Concurrent Engineering. – 2007. – P. 1-8. – URL: https://www.academia.edu/20012359/Complex_Modelling_Platform_based_on_Digital_Material_Representation?auto=download (дата обращения: 03.03.2025)
43. Furrer D., Dimiduk D., Ward C. Evolution of Model-Based Materials Definitions // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2024. – Issue 13. – P. 474-487. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40192-024-00353-7> (дата обращения: 03.03.2025)
44. Импортзамещение ПО для проектирования и технологической подготовки изделий из композиционных материалов. – URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=22903 (дата обращения: 03.03.2025)
45. Кто уходит из России: список компаний – Новости Право.ру. – URL: <https://pravo.ru/news/239550/?ysclid=I3453hghwb> (дата обращения: 14.03.2025)
46. В рамках форума «Открытые инновации» Алексей Боровков выступил на сессии «Новое промышленное программное обеспечение» – FEA.RU – CompMechLab – разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/НПС. – URL: <https://fea.ru/news/8802> (дата обращения: 20.03.2025)
47. Особо значимый проект: Импортзамещение программных продуктов Siemens NX, Teamcenter и FiberSIM. – URL: https://rfrit.ru/2023_oz14 (дата обращения: 14.03.2025)
48. На демо-дне ИЦК «Двигателестроение» рассказали о статусе реализации ОЗП отрасли. – URL: <https://rfrit.ru/news/na-demo-dne-itsk-dvigatelistroenie-rasskazali-o-statuse-realizatsii-ozp-otrasli/> (дата обращения: 14.03.2025)
49. Российские разработчики должны создать 2300 новых программ для промышленности за семь лет – Ведомости. – URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2022/12/19/956058-rossiiskie-razrabotchiki-dolzhni> (дата обращения: 14.03.2025)
50. CAD- и PLM-решения Аскона в Объединенной двигателестроительной корпорации. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:CAD-и_PLM-решения_Аскона_в_Объединенной_двигателестроительной_корпорации (дата обращения: 14.03.2025)

51. ОДК и АСКОН внедряют российское ПО для разработки перспективных двигателей. – URL: <https://www.uecrus.com/press/odk-i-askon-vnedryat-rossiyskoe-po-dlya-razrabotki-perspektivnykh-dvigatelay/> (дата обращения: 14.03.2025)
52. «1С» и «Аскону» дадут 2 миллиарда, чтобы избавиться от софта Siemens и Oracle конструкторов авиадвигателей – CNews. – URL: https://www.cnews.ru/news/top/2023-12-07_1s_i_askon_poluchat_2_milliarda (дата обращения: 14.03.2025)
53. Предприятие ОДК импортозаместит IT-продукты для конструкторов. – URL: https://www.uecrus.com/press/predpriyatie-odk-importozamestit-it-produkty-dlya-konstruktorov/?sphrase_id=32732 (дата обращения: 14.03.2025)
54. Особо значимый проект: Внедрение единой информационной среды ПАО "ОАК" для управления процессами разработки изделий АТ на основе подходов и методов системной инженерии и управления их жизненным циклом. – URL: https://rfrit.ru/2023_oz22 (дата обращения: 14.03.2025)
55. Проектирование авиатехники нового уровня: ОАК разрабатывает цифровую среду на базе T-FLEX PLM. – URL: <https://www1.ru/news/2024/05/25/proektirovanie-aviatexniki-novogo-urovnia-oak-razrabatyvaet-cifrovuiu-sredu-na-baze-t-flex.html> (дата обращения: 14.03.2025)
56. Правительство утвердило комплексную научно-техническую программу «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства». – URL: <http://government.ru/docs/49027/> (дата обращения: 03.03.2025)
57. Top 10 Material Trends & Innovations in 2025 – StartUs Insights. – URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-materials-industry-trends-innovations-2020-beyond/> (дата обращения: 03.03.2025)
58. Four Transformative Trends in Materials Science and Engineering – ZwickRoell. – URL: <https://www.zwickroell.com/news-events/news/four-transformative-trends-in-materials-science-and-engineering/> (дата обращения: 03.03.2025)
59. Top 10 Trends in Composite Materials (2025) – StartUs Insights. – URL: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/trends-in-composite-materials/> (дата обращения: 03.03.2025)
60. The Future of Materials Engineering: Innovations and Advancements. – URL: <https://www.constructionplacements.com/future-materials-engineering-innovations/> (дата обращения: 03.03.2025)
61. Recent trends in computational tools and data-driven modeling for advanced materials / V. Singh, S. Patra, N. Murugan, D. Toncu, A. Tiwari // Materials Advances. – 2022. – Issue 3. – P. 4069-4087. – URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ma/d2ma00067a> (дата обращения: 04.03.2025)
62. Импортозамещение в ИТ-сфере: примеры, перспективы, сложности, государственная поддержка – Блог DigitalRosatom. – URL: <https://digitalrosatom.ru/blog/182> (дата обращения: 20.03.2025)

63. Stoyanova M., Novikov A., Morozov S., Brom A. Digital material science for industrial companies // Journal of Physics: Conference Series – Advances in Composites Science and Technologies 2020 (ACST 2020). – 2021. – P. 1–5. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1990/1/012025/pdf> (дата обращения: 04.03.2025)
64. Johnson C. Faster Speed, Greater Opportunity // Composites Manufacturing Magazine. – URL: <https://compositesmanufacturingmagazine.com/2020/03/faster-speed-greater-opportunity/> (дата обращения: 25.02.2025)
65. Digital twins of composite materials / D. Ozhgibesova, A. Borovkov, V. Shtegman, D. Zainullina, S. Asanidze, M. Shulga, D. Kolchev, P. Mukhametova // XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 PROCEEDINGS. Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics. – 2024. – P. 289–294.
66. Daher CARAC TP project advances thermoplastic composites certification approach. – URL: <https://www.compositesworld.com/articles/daher-carac-tp-project-advances-thermoplastic-composites-certification-approach-> (дата обращения: 25.02.2025)
67. Специализированное ПО для оптимизации конструкций из композиционных материалов // Журнал «Передовые цифровые и производственные технологии» №5 (16–17) январь–июнь 2023. – URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2023/10/24/PD_sept2023_postr.pdf (дата обращения: 05.03.2025)
68. Intro to CAD-Connected Composites FEA: A Game-Changer for Composites Design – GoEngineer. – URL: <https://www.goengineer.com/blog/intro-to-cad-connected-composites-fea> (дата обращения: 04.03.2025)
69. Димитриенко Ю.И. Механика композитных конструкций при высоких температурах. Физматлит, 2018. – ISBN 978-5-9221-1822-4. – URL: <https://www.rfbr.ru/library/books/2885/> (дата обращения: 16.06.2025)
70. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. 1988. – 324 с. – URL: <https://lib-bkm.ru/10930> (дата обращения: 16.06.2025)
71. Composite Simulation in the Aerospace and Automotive Industries. – URL: <https://www.esi-group.com/blog/composite-simulation-in-the-aerospace-and-automotive-industries> (дата обращения: 04.03.2025)
72. Composite materials: Modeling, Processing, and Characterization – AIDAA. – URL: <https://www.aidaa.it/2021/04/26/composite-materials-modeling-processing-and-characterization/> (дата обращения: 04.03.2025)
73. Verification Validation and Uncertainty Quantification Terminology in Computational Modeling and Simulation – ASME – 2022. – URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/verification-validation-and-uncertainty-quantification-terminology-in-computational-modeling-and-simulation> (дата обращения: 06.06.2025)
74. Oberkampf W., Trucano T., Hirsch C. Verification, Validation, and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics – 2004. – Vol. 5. – Issue 57. – P. 1–40. – URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanicsreviews/article-abstract/57/5/345/464639/Verification-validation-and-predictive-capability?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 16.04.2025)

75. Kovalenko Y., Prokhorov Y. Methods and tools for assessing the accuracy of composite property models – 2024. – Issue 34. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492823026478> (дата обращения: 04.03.2025)
76. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р. – URL: <http://government.ru/docs/all/150406/> (дата обращения: 25.02.2025)
77. Closing the composites skills gap with Siemens Digital Industries Software solutions – Siemens Software. – URL: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-teesside-university/> (дата обращения: 04.03.2025)
78. The Lens. – URL: <https://www.lens.org/lens> (дата обращения: 21.12.2024)
79. Patent № 11347911, Int. Cl. G06F 30/23 (2020.01), G06F 111/10 (2020.01). Systems and methods of determining a numerical material model that optimally emulates physical material test results: № 16573052: 17.09.2019: published 31.05.2022 / Witowski K., Stander N., Basudhar A.; application filed by Livermore Software Technology LLC – 31.05.2022. – URL: <https://patents.google.com/patent/US11347911B2/en?q=Systems+and+methods+of+determining+a+numerical+material+model+that+optimally+emulates+physical+material+test+results+US+US+11347911+B2> (дата обращения: 03.04.2025)
80. Patent № 11797728, Int. Cl. G06F 30/20(2020.01), G06F 30/10 (2020.01). Automating extraction of material model coefficients for simulations: № US15929389: 30.04.2020: published 24.10.2023 / Vinay Kumar Carpenter, Prem Andrade, Ravindra Lahu Masal; application filed by Ansys Inc. – URL: <https://patents.google.com/patent/US11797728B2/en?q=+US+11797728+B2> (дата обращения: 03.04.2025)
81. Patent № 2778678, Int. Cl. G16C 20/30 (2019.01). Polymer material simulation method: № 12850926.2: 25.07.2012: published 06.11.2019 / Ueno Shinichi, Bito Yasumasa, Kishimoto Hiroyuki; application filed by Sumitomo Rubber Industries, Ltd.. – URL: <https://patents.google.com/patent/EP2778678B1/de?q=EP+2778678+B1> (дата обращения: 03.04.2025)
82. Patent № 101599103, Int. Cl. G06F 17/50 (2006.01). Material model influenced by weld thermal cycle and establishment method thereof: № CN2009100884073A: 29.06.2009: published 26.10.2011; application filed by Tsinghua University. – URL: [https://patents.google.com/patent/CN101599103B/en?q=\(Material+model+influenced+by+weld+thermal+cycle+and+establishment+method\)&oq=Material+model+influenced+by+weld+thermal+cycle+and+establishment+method+thereof](https://patents.google.com/patent/CN101599103B/en?q=(Material+model+influenced+by+weld+thermal+cycle+and+establishment+method)&oq=Material+model+influenced+by+weld+thermal+cycle+and+establishment+method+thereof) (дата обращения: 03.04.2025)
83. Патент на изобретение № RU2670922C9 Российская Федерация, СПК C08J 5/04 (2018.08); G06F 17/50 (2018.08). Способ автоматического построения модели гетерогенной волокнистой внутренней структуры композиционного материала: № 2017146035A: заявл. 27.12.2017: опубл. 13.12.2018 / Григорьев А. С., Шилько Е.В., Дмитриев А. И., Смолин А.Ю., заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) – 13 с.:ил. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2670922C9/ru?q=RU2670922C9+«Способ+автоматического+построения+модели+гетерогенной+волокнистой+внутренней+структуры+композиционного+материала»> (дата обращения: 03.04.2025)

84. Latent dirichlet allocation: Stability and applications to studies of user-generated content. – URL: https://www.researchgate.net/publication/266659698_Latent_dirichlet_allocation_Stability_and_applications_to_studies_of_user-generated_content (дата обращения: 04.04.2025)
85. Кольцов С.Н., Николенко С.И., Кольцова Е.Ю. Оптимизация метода семплирования по Гиббсу для анализа гранулированной среды – 2016. – Т. 42. – Вып. 16. – С. 21-25. – URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=pjtf&paperid=6324&option_lang=rus (дата обращения: 03.04.2025)
86. Giannozzi P., Brumme T., Andreussi O. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO – 6.02.2025. – ISSN 1361-648X. – URL: https://www.researchgate.net/publication/320072483_Advanced_capabilities_for_materials_modelling_with_Quantum_ESPRESSO (дата обращения: 03.04.2025)
87. Thompson A., Aktulga H., Berger R. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales. – URL: <https://www.sandia.gov/ccr/publications/details/lammps-a-flexible-simulation-tool-for-particle-based-materials-modeling-at-2022-02-01/> (дата обращения: 03.04.2025)
88. Walsh A. Kesterite Thin-Film Solar Cells: Advances in Materials Modelling of Cu₂ZnSnS₄ – 2012. – Vol. 2. – Issue 4. – URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201100630> (дата обращения: 03.04.2025)
89. Materials Modelling Software Market 2020. – URL: <https://zenodo.org/records/4016090> (дата обращения: 04.03.2025)
90. Digital engineering in shipbuilding / A. Borovkov, M. Khovaiko, E. Martynets, Y. Ryabov, N. Prytkov, V. Anufrieva, I. Ponyaeva, A. Aleksashkin, A. Mikhailov, O. Rozhdestvensky // XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 PROCEEDINGS. Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics. – 2024. – P. 269-278.
91. Top Molecular Modeling Software in 2025. – URL: <https://slashdot.org/software/molecular-modeling/> (дата обращения: 04.03.2025)
92. Materials Modeling and Simulation – Commercial Software. – URL: <https://polymerexpert.biz/blog/164-software-for-materials-modeling-and-simulation> (дата обращения: 04.03.2025)
93. Siemens strengthens leadership in industrial software and AI with acquisition of Altair Engineering. – URL: <https://newsroom.sw.siemens.com/en-US/siemens-altair/> (дата обращения: 04.03.2025)
94. Componeering и Altair Engineering анонсируют вебинар, посвященный интеграции HyperWorks и ESAComp для наиболее эффективного анализа композиционных структур. – URL: <https://hyperworks.compmechlab.ru/news/5991> (дата обращения: 21.02.2025)
95. Design and Simulation Platform Altair HyperWorks. – URL: <https://altair.com/altair-hyperworks> (дата обращения: 04.03.2025)
96. Altair OptiStruct Applications. – URL: <https://altair.com/optistruct-applications> (дата обращения: 04.03.2025)
97. Designing with Continuous Fiber Materials – Altair. – URL: <https://altair.com/composites> (дата обращения: 04.03.2025)

98. Material Solutions – Altair. – URL: <https://altair.com/materials> (дата обращения: 04.03.2025)
99. Altair Material Data Center™. – URL: <https://altair.com/material-data-center> (дата обращения: 04.03.2025)
100. Altair Multiscale Designer. – URL: <https://altair.com/multiscale-designer/> (дата обращения: 04.03.2025)
101. Altair HyperXtrude 2022 Release Notes. – URL: https://2022.help.altair.com/2022/hwsolvers/altair_help/topics/release_notes/rn_2022_hyperxtrude_r.htm (дата обращения: 04.03.2025)
102. FAQs – Synopsys and Ansys – Joining Forces. – URL: <https://synopsysansys.transaction-facts.com/faqs/> (дата обращения: 04.03.2025)
103. Synopsys Responds to U.K. Competition and Markets Authority's Phase 1 Announcement Regarding Ansys Acquisition. – URL: <https://news.synopsys.com/2025-03-05-Synopsys-Responds-to-U-K-Competition-and-Markets-Authoritys-Phase-1-Announcement-Regarding-Ansys-Acquisition> (дата обращения: 04.03.2025)
104. Ansys Composite PrepPost (ACP) for developers – Ansys Developer Portal. – URL: <https://developer.ansys.com/docs/аср> (дата обращения: 18.02.2025)
105. ANSYS Composite – Механика деформируемого твердого тела – CAE Expert. – URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-composite> (дата обращения: 18.02.2025)
106. Ansys Granta Materials Information Management. – URL: <https://www.ansys.com/products/materials> (дата обращения: 05.03.2025)
107. Ansys Granta Selector. – URL: <https://www.ansys.com/products/materials/granta-selector> (дата обращения: 05.03.2025)
108. Granta Materials Data for Simulation. – URL: <https://www.ansys.com/products/materials/materials-data-for-simulation> (дата обращения: 05.03.2025)
109. Multiscale.Sim – Multiscale analysis system – EnginSoft. – URL: <https://www.enginsoft.com/solutions/multiscale.html> (дата обращения: 05.03.2025)
110. Ansys Store Multiscale Analysis System V2.2. – URL: <https://catalog.ansys.com/product/5dc1ce0b393ff6a6a8037953/multiscale-analysis> (дата обращения: 05.03.2025)
111. Product Lineup – CAE Ansys. – URL: https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/multiscale/en/multiscale_sim/ (дата обращения: 05.03.2025)
112. Autodesk Material Library. – URL: <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-uninstall-and-reinstall-Autodesk-Material-Library.html> (дата обращения: 05.03.2025)
113. Autodesk Inventor: 3D modeling software for designers and engineers. – URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview> (дата обращения: 05.03.2025)
114. Autodesk Inventor Nastran: Powerful CAD-integrated simulation. – URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor-nastran/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата обращения: 05.03.2025)
115. Cadence Completes Acquisition of OpenEye Scientific. – URL: <https://www.eyesopen.com/news/cadence-completes-acquisition-of-openeye-scientific> (дата обращения: 05.03.2025)

116. Molecular Modeling Software – OpenEye Scientific. – URL: <https://www.eyesopen.com/> (дата обращения: 05.03.2025)
117. Cloud Based Computational Chemistry Software – Orion. – URL: <https://www.eyesopen.com/orion> (дата обращения: 05.03.2025)
118. Program Libraries for Customer Applications. – URL: <https://www.eyesopen.com/cheminformatics-modeling-toolkits> (дата обращения: 05.03.2025)
119. COMSOL Multiphysics Model Builder Features and Functionality. – URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics/model-builder> (дата обращения: 05.03.2025)
120. COMSOL Multiphysics Simulation Software. – URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата обращения: 05.03.2025)
121. COMSOL Material Library. – URL: <https://www.comsol.com/material-library> (дата обращения: 05.03.2025)
122. COMSOL Composite Materials Module. – URL: <https://www.comsol.com/composite-materials-module> (дата обращения: 05.03.2025)
123. COMSOL Metal Processing Module. – URL: <https://www.comsol.com/metal-processing-module> (дата обращения: 05.03.2025)
124. COMSOL Nonlinear Structural Materials Module. – URL: <https://www.comsol.com/nonlinear-structural-materials-module> (дата обращения: 05.03.2025)
125. BIOVIA Materials Studio – Polymers & Composites – Dassault Systèmes. – URL: <https://www.3ds.com/products/biovia/materials-studio/polymers-composites> (дата обращения: 24.02.2025)
126. BIOVIA Materials Studio. – URL: <https://www.3ds.com/products/biovia/materials-studio> (дата обращения: 06.03.2025)
127. Materials Science & Engineering Software – BIOVIA. – URL: <https://www.3ds.com/products/biovia/materials-science-engineering> (дата обращения: 06.03.2025)
128. Scientific Software BIOVIA. – URL: <https://www.3ds.com/products/biovia> (дата обращения: 06.03.2025)
129. Structural Simulation SIMULIA. – URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/structural-simulation> (дата обращения: 06.03.2025)
130. Composites Modeler for Abaqus/CAE SIMULIA. – URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/composites-modeler> (дата обращения: 06.03.2025)
131. Engineering Simulation Software & Analysis Tools – SOLIDWORKS. – URL: <https://www.solidworks.com/domain/simulation> (дата обращения: 06.03.2025)
132. ESI Group and Keysight Technologies announce the completion today of the acquisition of a controlling block of shares in ESI Group by Keysight Technologies. – URL: <https://www.esi-group.com/news/esi-group-and-keysight-technologies-announce-the-completion-today-of-the-acquisition-of-a-controlling-block-of-shares-in-esi-group-by-keysight-technologies> (дата обращения: 07.03.2025)

133. PAM-COMPOSITES Composite Simulation Software. – URL: <https://www.esi-group.com/products/pam-composites> (дата обращения: 07.03.2025)
134. Применение моделирования при разработке технологий изготовления конструкции из ПКМ. – URL: <https://compositeworld.ru/articles/tech/id6245a17e1b3460001240269b> (дата обращения: 07.03.2025)
135. ProCAST Casting Simulation Software. – URL: <https://www.esi-group.com/products/procast> (дата обращения: 07.03.2025)
136. Digital Materials – Hexagon. – URL: <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/hxgn-digital-materials> (дата обращения: 07.03.2025)
137. Digimat – Hexagon. – URL: <https://hexagon.com/products/digimat> (дата обращения: 07.03.2025)
138. Гонтюк А.П. Комплексное решение Digimat для аддитивных технологий: композиционный материал, процесс изготовления, характеристики конструкции // CADmaster. – 2018. – Вып. 1(87). – С. 84–89. – URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_87_18.html (дата обращения: 07.03.2025)
139. MaterialCenter – Hexagon. – URL: <https://hexagon.com/products/materialcenter> (дата обращения: 07.03.2025)
140. MaterialCenter Databanks – Hexagon. – URL: <https://hexagon.com/products/materialcenter-databanks> (дата обращения: 07.03.2025)
141. MSC Nastran – Hexagon. – URL: <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/msc-nastran> (дата обращения: 07.03.2025)
142. Features of LS-DYNA – CAE Solution – JSOL Corporation. – URL: <https://www.jsol-cae.com/en/product/structure/lsdyna/feature/> (дата обращения: 07.03.2025)
143. J-Composites Features – CAE Solution – JSOL Corporation. – URL: <https://www.jsol-cae.com/en/product/manufacturing/jcomposites/feature/> (дата обращения: 07.03.2025)
144. JSTAMP Functions – CAE Solution – JSOL Corporation. – URL: <https://www.jsol-cae.com/en/product/manufacturing/jstamp/function/> (дата обращения: 07.03.2025)
145. J-OCTA Functions – CAE Solutions – JSOL Corporation. – URL: <https://www.j-octa.com/functions/> (дата обращения: 07.03.2025)
146. About J-OCTA – CAE Solutions – JSOL Corporation. – URL: <https://www.j-octa.com/about-j-octa/> (дата обращения: 07.03.2025)
147. Materials & Process Informatics – Machine Learning for Materials Design in J-OCTA – JSOL Corporation. – URL: https://www.j-octa.com/about-j-octa/materials_process_informatics.html (дата обращения: 07.03.2025)
148. Fibersim software composites design – Siemens Software. – URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/products/fibersim-composites/> (дата обращения: 20.02.2025)
149. NX Composites: Part One – Tips and Tricks. – URL: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/composites-part-one-tips-and-tricks/> (дата обращения: 07.03.2025)
150. Mechanical product design software – Siemens. – URL: <https://www.sw.siemens.com/en-US/solutions/product-design/> (дата обращения: 07.03.2025)

151. Composite Materials Performance Evaluation – using a fast, virtual testing tool – Siemens. – URL: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/composite-materials-performance-evaluation-using-a-fast-virtual-testing-tool/> (дата обращения: 07.03.2025)
152. White paper Streamlining simulation workflow for composites – Siemens. – URL: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/white-paper-streamlining-simulation-workflow-for-composites> (дата обращения: 07.03.2025)
153. Simcenter Cugli software. – URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/cugli/> (дата обращения: 07.03.2025)
154. QuantumATK – Polymer Simulations – Synopsys. – URL: <https://www.synopsys.com/manufacturing/quantumatk/news-and-events/polymer-simulations.html> (дата обращения: 10.03.2025)
155. QuantumATK – Atomistic Simulation Software – Synopsys. – URL: <https://www.synopsys.com/manufacturing/quantumatk.html> (дата обращения: 10.03.2025)
156. QuantumATK – Atomistic Simulation for Materials Modeling Applications – Synopsys. – URL: <https://www.synopsys.com/manufacturing/quantumatk/materials-modeling/applications.html> (дата обращения: 10.03.2025)
157. QuantumATK Solutions for Materials Modeling – Synopsys. – URL: <https://www.synopsys.com/manufacturing/quantumatk/materials-modeling.html> (дата обращения: 10.03.2025)
158. Simpleware for Complex Materials Modeling – Synopsys. – URL: <https://www.synopsys.com/simpleware/materials-and-manufacturing/materials-modeling.html> (дата обращения: 10.03.2025)
159. RADAR – Единая витрина для поиска технологических компаний, инвесторов, корпораций, мер поддержки, экспертов, мероприятий и инвестиционных сделок. – URL: <https://radar.leader-id.ru/> (дата обращения: 14.03.2025)
160. Платформа НТИ запустила RADAR // ComNews. – URL: <https://www.comnews.ru/content/228323/2023-08-23/2023-w34/platforma-nti-zapustila-radar> (дата обращения: 14.03.2025)
161. Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества». – URL: <https://nti.bmstu.ru/> (дата обращения: 11.03.2025)
162. Центр НТИ «Моделирование и разработка новых функциональных материалов с заданными свойствами». – URL: https://nti2035.ru/technology/competence_centers/ngu.php (дата обращения: 03.04.2025)
163. «Росатом» выпустил обновленную версию программного пакета «Логос». – URL: <https://atommedia.online/2024/06/14/rosatom-vypustil-obnovlennuju-vers/> (дата обращения: 10.03.2025)
164. В Иркутском политехе обсудили преимущества модуля «ЛОГОС-Прочность» разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ. – URL: <https://vniief.ru/presscenter/news/54716200427d8777a561b7aa8bdffc43> (дата обращения: 10.03.2025)
165. «Логос» – линейка цифровых продуктов Росатома. – URL: <https://atommedia.online/reference/logos-linejka-cifrovyyh-produktov/> (дата обращения: 10.03.2025)

166. Логос – МЦД – Моделирование и Цифровые двойники. – URL: <https://digitaltwin.ru/products/logos/> (дата обращения: 10.03.2025)
167. Для продвижения пакета «Логос» разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ будет создана дистрибьюторская сеть. – URL: <https://vniief.ru/presscenter/news/895575804c0ab66a9bf4bfba9a6d09b1> (дата обращения: 10.03.2025)
168. Логос Тепло. – URL: <https://logos.vniief.ru/logos/heat/> (дата обращения: 20.03.2025)
169. Логос Прочность. – URL: <https://logos.vniief.ru/logos/durability/> (дата обращения: 20.03.2025)
170. Логос: комплекс обновлений цифрового продукта – Блог DigitalRosatom. – URL: <https://digitalrosatom.ru/blog/134> (дата обращения: 10.03.2025)
171. Пленарная сессия по итогам стратегической сессии «CAD/CAE/PLM/PDM-решения – настоящее и будущее инженерного ПО в России». – URL: <https://npt-forum.ru/plenarnaya-sessiya-po-itogam-strategicheskoy-sessii-cad-cae-plm-pdm> (дата обращения: 11.03.2025)
172. Вклад МГТУ им. Н.Э. Баумана в разработку отечественного инженерного и образовательного ПО, 2022. – URL: <https://soyuzmash.ru/docs/kom/121241/Dmitrienko.pdf> (дата обращения: 11.03.2025)
173. В рамках VI Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии» состоялся экспертный трек по отечественному инженерному программному обеспечению: ключевые достижения, перспективы развития, итоги – НЦМУ «Передовые цифровые технологии». – URL: <https://ncmu.spbstu.ru/news/8964> (дата обращения: 05.05.2025)
174. Дмитриенко 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.
175. Ученые создают платформу для цифрового материаловедения. – URL: <https://ab-news.ru/platforma-dlya-cifrovogo-materialovedeniya/> (дата обращения: 11.03.2025)
176. Научно-практическая конференция с международным участием «Цифровое материаловедение-2024» – Центр НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии». – URL: <https://nticenter.spbstu.ru/activity/884> (дата обращения: 11.03.2025)
177. О компании // Fidesys. – URL: <https://cae-fidesys.com/company> (дата обращения: 14.03.2025)
178. CAE Fidesys // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/project-116> (дата обращения: 14.03.2025)
179. CAE Fidesys Composite // Fidesys. – URL: <https://cae-fidesys.com/cae-fidesys-composite> (дата обращения: 14.03.2025)
180. Материалы по вычислению эффективных свойств композиционных материалов в Фидесис. – URL: <https://fidesys-solvers.ru/analysis/composites/effective-properties> (дата обращения: 11.03.2025)
181. CAE Fidesys – отечественная CAE-платформа, позволяющая решать задачи статической и динамической прочности. – URL: <https://cml-software.ru/products/fidesys> (дата обращения: 11.03.2025)

182. Пакет прочностного инженерного анализа Фидесис // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/paket-procnostnogo-inzenernogo-analiza-fidesis> (дата обращения: 14.03.2025)
183. Платформа для автоматизации конструкторских работ на основе Fidesys // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/paket-inzenernogo-analiza-fidesis> (дата обращения: 14.03.2025)
184. CAE Fidesys // Реестр программного обеспечения. – URL: <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/303920/> (дата обращения: 14.03.2025)
185. Анализ прочности конструкций из композиционных материалов – НТЦ «АПМ». – URL: <https://apm.ru/analysis-of-strength-of-structures-made-of-composites> (дата обращения: 11.03.2025)
186. Ключевые проекты // НТЦ АПМ. – URL: <https://apm.ru/key-projects> (дата обращения: 14.03.2025)
187. FSI – Решение задач взаимодействия жидкости и конструкций – Инженерные программы ТЕСИС. – URL: https://tesis.com.ru/own_design/fsi/ (дата обращения: 11.03.2025)
188. Основные возможности FlowVision. – URL: <https://flowvision.ru/ru/flowvision-technologies/description> (дата обращения: 11.03.2025)
189. О нас // ТЕСИС. – URL: <https://tesis.com.ru/company/about/> (дата обращения: 14.03.2025)
190. Библиотека веществ – FlowVision – Инженерные программы ТЕСИС. – URL: https://tesis.com.ru/own_design/flowvision/library.php (дата обращения: 11.03.2025)
191. ООО НПО «ПК» // РБК Компании. – URL: <https://companies.rbc.ru/id/1174401002126-ooo-nauchno-proizvodstvennoe-obedinenie-programmiruemyie-kompozityi/> (дата обращения: 14.03.2025)
192. Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography (USPEX). – URL: <https://uspex-team.org/ru/uspex/overview> (дата обращения: 29.04.2025)
193. RADAR – ООО "ТЕСИС". – URL: <https://radar.leader-id.ru/company/7731238717> (дата обращения: 14.03.2025)
194. RADAR – ООО НТЦ "АПМ". – URL: <https://radar.leader-id.ru/company/5018019971> (дата обращения: 14.03.2025)
195. Отчетность организации ООО НПО «ПК» // List-Org. – URL: <https://www.list-org.com/company/9721960/report> (дата обращения: 14.03.2025)
196. ООО «ФИДЕСИС» // Ресурс БФО. – URL: <https://bo.nalog.ru/organizations-card/4618021#financialResult> (дата обращения: 14.03.2025)
197. Altair Enhances Leadership in Optimization Technology by Acquiring OmniQuest. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-acquires-omniquest> (дата обращения: 12.03.2025)
198. Cadence Completes Acquisition of BETA CAE. – URL: https://www.cadence.com/en_US/home/company/newsroom/press-releases/pr/2024/cadence-completes-acquisition-of-beta-cae.html (дата обращения: 12.03.2025)

- 199.Почему на рынке информационных технологий идет консолидация – Блог ДАР. – URL: <https://data.korusconsulting.ru/press-center/blog/pochemu-na-rynke-informatsionnykh-tekhnologiy-idet-konsolidatsiya/> (дата обращения: 12.03.2025)
- 200.Altair Announces Material Collaboration with HP Inc. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-announces-material-collaboration-with-hp-inc> (дата обращения: 12.03.2025)
- 201.Altair Names Cimatron, part of Sandvik Group, as Global Channel Partner. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-names-cimatron-part-of-sandvik-group-as-global-channel-partner> (дата обращения: 12.03.2025)
- 202.QSD by Cetim – Altair. – URL: <https://altair.com/qsd> (дата обращения: 12.03.2025)
- 203.Ansys' Collaboration with Schrödinger will Accelerate Materials Development with Unprecedented Multiscale Simulation. – URL: <https://www.ansys.com/news-center/press-releases/5-7-24-ansys-schrodinger-materials-development> (дата обращения: 12.03.2025)
- 204.Ansys, Schaeffler Collaboration Drives Sustainable Product Development. – URL: <https://www.ansys.com/news-center/press-releases/2-14-24-ansys-schaeffler-drive-sustainable-product-development> (дата обращения: 12.03.2025)
- 205.ESI Group and FAW-Volkswagen TE Forge Strategic Partnership to Advance Automotive Intelligent Simulation Technology. – URL: <https://www.esi-group.com/news/esi-group-and-faw-volkswagen-te-forge-strategic-partnership-to-advance-automotive-intelligent-simulation-technology> (дата обращения: 12.03.2025)
- 206.Новости – CAEFidesys. – URL: <https://cae-fidesys.com/news> (дата обращения: 13.03.2025)
- 207.ГК Softline (ПАО «Софтлайн») удостоена статуса золотого партнера вендора ИТЦ АПМ. – URL: <https://apm.ru/softline-zolotoy-partner-ntts-apm> (дата обращения: 13.03.2025)
- 208.Консорциум РазвИТие. – URL: <https://plmrussia.ru/> (дата обращения: 13.03.2025)
- 209.Сквозное решение консорциума «РазвИТие». – URL: <https://plmrussia.ru/solution/> (дата обращения: 13.03.2025)
- 210.Форум РАЗВИТИЕ-2024: системная инженерия, композиты и управление расчетами в российском PLM — Консорциум РазвИТие. – URL: <https://plmrussia.ru/news/forum-razvitie-2024-sistemnaya-inzheneriya-kompozity-i-upravlenie-raschetami-v-rossijskom-plm/> (дата обращения: 13.03.2025)
- 211.Развитие консорциум российских разработчиков инженерного программного обеспечения. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Компания:Развитие_консорциум_российских_разработчиков_инженерного_программного_обеспечения (дата обращения: 13.03.2025)
- 212.Altair Expands its Presence with New Office in Downtown Thessaloniki, Greece. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-expands-its-presence-with-new-office-in-downtown-thessaloniki-greece> (дата обращения: 13.03.2025)
- 213.Altair Establishes New Office in Yokneam Illit, Israel. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-establishes-new-office-in-yokneam-illit--israel> (дата обращения: 13.03.2025)
- 214.Altair Establishes New Office in Zurich, Switzerland. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-establishes-new-office-in-zurich-switzerland> (дата обращения: 13.03.2025)

215. Experimental generative AI model for 3D shapes – Autodesk News. – URL: <https://adsknews.autodesk.com/en/news/research-project-bernini/> (дата обращения: 13.03.2025)
216. Materials informatics accelerates customer tailored composite material design – Simcenter. – URL: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/material-informatics-accelerates-customer-tailored-composite-material-design/> (дата обращения: 13.03.2025)
217. Digital Open Marketplace Ecosystem 4.0 (DOME 4.0) – Project H2020 – CORDIS – European Commission. – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/953163> (дата обращения: 13.03.2025)
218. Компания «ТЕСИС» и представители Сколтеха посетили Передовую инженерную школу СПбПУ «Цифровой инжиниринг» для обсуждения проекта в рамках реализации Дорожной карты НТИ «Технет 4.0» – FEA.RU – CompMechLab – разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/HPC. – URL: <https://fea.ru/news/8723> (дата обращения: 14.03.2025)
219. Экспериментально-цифровая платформа сертификации. – URL: <https://technet-nti.ru/article/eksperimentalno-cifrovaya-platforma-sertifikacii2> (дата обращения: 14.03.2025)
220. ТЕСИС, Сколтех и СПбПУ обсудили проект «Экспериментально-цифровой платформы сертификации» НТИ «Технет 4.0». – URL: <https://tesis.com.ru/infocenter/news/detail.php?id=2896> (дата обращения: 14.03.2025)
221. Экспериментально-цифровая сертификация – ТЕСИС. – URL: https://tesis.com.ru/own_design/certif/ (дата обращения: 14.03.2025)
222. «Росатом» создаст систему управления данными о свойствах материалов. – URL: <https://strana-rosatom.ru/2024/12/09/rosatom-sozdast-sistemu-upravleni/> (дата обращения: 14.03.2025)
223. Пензкомпрессормаш // Fidesys. – URL: <https://cae-fidesys.com/success-story-penzcompress> (дата обращения: 14.03.2025)
224. CAE Fidesys Composite // Fidesys. – URL: <https://cae-fidesys.com/cae-fidesys-composite> (дата обращения: 14.03.2025)
225. Расчеты объектов атомной энергетики // НТЦ АПМ. – URL: <https://apm.ru/calculations-of-nuclear-power-facilities> (дата обращения: 14.03.2025)
226. Экспертиза аварии на Саяно-Шушенской ГЭС // НТЦ АПМ. – URL: <https://apm.ru/examination-of-the-accident-at-the-sayano-shushenskaya-hpp> (дата обращения: 14.03.2025)
227. Расчет на прочность основания буровой установки // АПМ. – URL: <https://apm.ru/the-calculation-of-foundation-drilling-rig> (дата обращения: 14.03.2025)
228. Расчет аттракционов «Колесо обозрения» // НТЦ АПМ. – URL: <https://apm.ru/the-calculation-of-the-rides-the-ferris-wheel-29> (дата обращения: 14.03.2025)
229. Инжиниринговая компания ТЕСИС. – URL: <https://tesis.com.ru/?ysclid=m6f5rwy37131077477> (дата обращения: 14.03.2025)
230. Уральский завод гражданской авиации (УЗГА) внедряет российский программный комплекс междисциплинарного моделирования FlowVision от компании ТЕСИС // isicad. – URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=22719 (дата обращения: 14.03.2025)

231. Разработка методов проектирования 3D текстильных преформ для производства композиционных материалов // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/razrabotka-metodov-proektirovaniya-zd-tekstilnyh-preform-dla-proizvodstva-kompozicionnyh-materialov> (дата обращения: 14.03.2025)
232. Проектирование и изготовление оборудования для производства цельнотканых 3D преформ композиционных деталей с повышенной прочностью // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/proektirovanie-i-izgotovlenie-oborudovaniya-dla-proizvodstva-celnotkanyh-3d-preform-kompozicionnyh-detalej-s-povysennoj-procnostu> (дата обращения: 14.03.2025)
233. ООО НПО «ПК» // B2B.house. – URL: https://b2b.house/company/000-NPO-PK_b441dc81-83ab-4e32-ae01-e9b7c06888f6/ (дата обращения: 14.03.2025)
234. ОДК разработала детали двигателя ПД-14 с помощью российской системы «КОМПАС-Композиты» // Сделано у нас – 4.06.2025. – URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/168769/> (дата обращения: 06.06.2025)
235. Materials Genome Initiative. – URL: <https://www.mgi.gov/> (дата обращения: 01.04.2025)
236. NSF Efforts to Achieve the Nation's Vision for the Materials Genome Initiative. Consensus Study Report.. – URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/26723/chapter/3#11> (дата обращения: 02.04.2025)
237. Designing Materials to Revolutionize and Engineer our Future (DMREF). NSF – National Science Foundation. – URL: <https://www.nsf.gov/funding/opportunities/dmref-designing-materials-revolutionize-engineer-our-future/nsf25-508/solicitation> (дата обращения: 02.04.2025)
238. Designing Materials to Revolutionize and Engineer our Future (DMREF). – URL: <https://dmref.org/projects> (дата обращения: 02.04.2025)
239. DMREF: Closed-Loop Design of Polymers with Adaptive Networks for Extreme Mechanics. – URL: <https://dmref.org/projects/351> (дата обращения: 02.04.2025)
240. DMREF: Open source software and databases. – URL: <https://dmref.org/tools> (дата обращения: 02.04.2025)
241. Materials Project. – URL: <https://next-gen.materialsproject.org/> (дата обращения: 02.04.2025)
242. Computational Materials Sciences (CMS) – Awards List. – URL: <https://science.osti.gov/bes/Research/Computational-Materials-and-Chemical-Sciences-CMS-CCS/Computational-Materials-Sciences/Computational-Materials-Sciences-Awards-List> (дата обращения: 03.04.2025)
243. Wang H., Xie J. Editorial for Special Issue on Materials Genome Engineering – 24.01.2020. – Vol. 6. – Issue 6. – P. 585-586. – ISSN 2095-8099. – DOI 10.1016/j.eng.2020.05.007. – URL: <https://www.engineering.org.cn/engi/EN/10.1016/j.eng.2020.05.007> (дата обращения: 02.04.2025)
244. O'Meara S. Materials science is helping to transform China into a high-tech economy – 1.03.2019. – Vol. 567. – Issue 7748. – ISSN 00280836. – URL: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=HRCA&sw=w&issn=00280836&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA579584693&sid=googleScholar&linkaccess=abs> (дата обращения: 02.04.2025)

- 245.Xie J., Su Y., Zhang D., Feng Q. A Vision of Materials Genome Engineering in China – 24.01.2022. – Vol. 10. – Issue 3. – P. 10-12. – ISSN 2095-8099. – DOI 10.1016/j.eng.2021.12.008. – URL: <https://www.engineering.org.cn/engi/EN/10.1016/j.eng.2021.12.008> (дата обращения: 02.04.2025)
- 246.Mingjia Y. Materials informatics platform with three dimensional structures, workflow and thermoelectric applications – 25.02.2025. – DOI 10.1038/s41597-021-01022-6. – URL: https://www.researchgate.net/publication/354410798_Materials_informatics_platform_with_three_dimensional_structures_workflow_and_thermoelectric_applications (дата обращения: 02.04.2025)
- 247.A repository for the publication and sharing of heterogeneous materials data | Scientific Data. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-022-01897-z> (дата обращения: 03.04.2025)
- 248.An automatic scientific data collection framework for materials science – 1.04.2025. – Vol. 252. – Article 113772. – ISSN 0927-0256. – DOI 10.1016/j.commatsci.2025.113772. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025625001156> (дата обращения: 03.04.2025)
- 249.Beijing Computational Science Research Center: Division Materials and Energy. – URL: https://www.csrc.ac.cn/en/divisions/materials_and_energy/ (дата обращения: 03.04.2025)
- 250.Beijing Computational Science Research Center: Division Simulation of Physical Systems. – URL: https://www.csrc.ac.cn/en/divisions/simulation_of_physical_system/ (дата обращения: 03.04.2025)
- 251.New big data center for materials in China by 2035. – URL: <https://inspenet.com/en/noticias/china-big-data-center-materials-2035/> (дата обращения: 03.04.2025)
- 252.The Novel Materials Discovery Laboratory (NoMaD Project). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/676580> (дата обращения: 03.04.2025)
- 253.NOMAD. – URL: <https://nomad-lab.eu/nomad-lab/nomad-lab.html> (дата обращения: 03.04.2025)
- 254.Computational Materials Science Centers and Projects Around the World. – URL: <https://miccom-center.org/centers.html> (дата обращения: 03.04.2025)
- 255.MAterials design at eXascale. – URL: <https://max-centre.eu/software/libraries> (дата обращения: 03.04.2025)
- 256.Open data and industry driven environment for multiphase and multiscale Materials Characterization and Modelling combining physics and data-based approaches (MatCHMaker). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101091687/reporting> (дата обращения: 03.04.2025)
- 257.Advanced modelling and characterization for power semiconductor materials and technologies (AddMorePower Project). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101091621> (дата обращения: 03.04.2025)
- 258.AI powered characterization and modelling for GREEn STEel technology (AID4GREENEST Project). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101091912> (дата обращения: 03.04.2025)

259. Integrated Computational-Experimental material Engineering of Thermal Spray coatings (Co-BRAIN Project). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101092211> (дата обращения: 03.04.2025)
260. Durability modelling of composite structures with arbitrary lay-up using standardized testing and artificial intelligence (D-STANDART project). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101091409> (дата обращения: 03.04.2025)
261. DiMAT Project. – URL: <https://dimat-project.eu/> (дата обращения: 03.04.2025)
262. Digital Modelling and Simulation for Design, Processing and Manufacturing of Advanced Materials (DiMAT Project). – URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/101091496> (дата обращения: 03.04.2025)
263. Mission Innovation. – URL: <https://mission-innovation.net/> (дата обращения: 03.04.2025)
264. IIT Kanpur to lead one of the three Integrated Clean Energy Material Acceleration Platforms (IC-MAP) launched by Department of Science & Technology. – URL: <https://www.iitk.ac.in/new/integrated-clean-energy-material-acceleration-platforms> (дата обращения: 03.04.2025)
265. Национальный проект Новые материалы и химия. – URL: <https://xn--80aarpmpemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/novye-materialy-i-khimiya/> (дата обращения: 03.04.2025)
266. Основные показатели и мероприятия национального проекта «Новые материалы и химия». – URL: <http://government.ru/info/54322/> (дата обращения: 03.04.2025)
267. Государственная Дума приняла во втором чтении проект федерального бюджета на 2025-2027 годы // minfin.gov.ru. – URL: https://minfin.gov.ru/ru/press-center/?id_4=39444-gosudarstvennaya_duma_prinyala_vo_vtorom_chtenii_proekt_federalnogo_byudzheta_na_2025-2027_gody (дата обращения: 03.04.2025)
268. From toys to human organs – the diversified world of 3D printing – IEC e-tech. – URL: <https://etech.iec.ch/issue/2017-05/from-toys-to-human-organs-the-diversified-world-of-3d-printing> (дата обращения: 15.03.2025)
269. ISO/IEC JTC 1/SC 32 – Data management and interchange. – URL: <https://www.iso.org/committee/45342.html> (дата обращения: 05.03.2025)
270. ISO/IEC JTC 1/SC 7 – Software and systems engineering. – URL: <https://www.iso.org/committee/45086.html> (дата обращения: 10.03.2025)
271. Overview of the SC 7 Standards Collection. – URL: <https://committee.iso.org/sites/jtc1sc7/home/projects/overview.html> (дата обращения: 10.03.2025)
272. ISO/IEC JTC 1/SC 7 – Encyclopedia MDPI. – URL: <https://encyclopedia.pub/entry/27812> (дата обращения: 10.03.2025)
273. ISO/IEC 19770-1:2017/Amd 1:2024 – Information technology – IT asset management – Part 1: IT asset management systems – Requirements – Amendment 1: Climate action changes. – URL: <https://www.iso.org/standard/88433.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)
274. ISO/IEC/IEEE 41062:2024 – Software engineering – Life cycle processes – Software acquisition. – URL: <https://www.iso.org/standard/81503.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)

- 275.ISO/IEC/IEEE 24748-1:2024 – Systems and software engineering – Life cycle management – Part 1: Guidelines for life cycle management. – URL: <https://www.iso.org/standard/84709.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)
- 276.ISO/IEC/IEEE 24748-2:2024 – Systems and software engineering – Life cycle management – Part 2: Guidelines for the application of ISO/IEC/IEEE 15288 (system life cycle processes). – URL: <https://www.iso.org/standard/84661.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)
- 277.ISO/IEC 25002:2024 – Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Quality model overview and usage. – URL: <https://www.iso.org/standard/78175.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)
- 278.ISO/IEC 25040:2024 – Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Quality evaluation framework. – URL: <https://www.iso.org/standard/83467.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)
- 279.ISO/IEC 5212:2024 – Information technology – Data usage – Guidance for data usage. – URL: <https://www.iso.org/standard/80999.html?browse=tc> (дата обращения: 25.02.2025)
- 280.Standards by ISO/TC 61 Plastics. – URL: <https://www.iso.org/committee/49256/x/catalogue/> (дата обращения: 25.02.2025)
- 281.ISO/TC 61/SC 9 – Thermoplastic materials. Published standards. – URL: <https://www.iso.org/committee/49366/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0> (дата обращения: 03.03.2025)
- 282.Standards by ISO/TC 61/SC 9 Thermoplastic materials. – URL: <https://www.iso.org/committee/49366/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0> (дата обращения: 25.02.2025)
- 283.Standards by ISO/TC 61/SC 13 Composites and reinforcement fibres. – URL: <https://www.iso.org/committee/49462/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0> (дата обращения: 25.02.2025)
- 284.CEN/TC 304 – Information and communications technologies – European localization requirements. – URL: https://standards.cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:7:0:::FSP_ORG_ID:6285&cs=1DE1246DFD87F19EE40AA828E5BCABDC3 (дата обращения: 04.03.2025)
- 285.CEN/TC 304 – Information and communications technologies – European localization requirements – Published Standards. – URL: https://standards.cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:32:0:::FSP_ORG_ID:6285&cs=1DE1246DFD87F19EE40AA828E5BCABDC3 (дата обращения: 25.02.2025)
- 286.CEN – CEN/TC 249. – URL: https://standards.cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:29:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:6230,25&cs=10D7233B31AB00F12A6A805994D16E791#1 (дата обращения: 04.03.2025)
- 287.CEN/TC 249 Published Standards. – URL: https://standards.cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:32:0:::FSP_ORG_ID:6230&cs=170C05F24EF08AC268C42E03B8F786259 (дата обращения: 25.02.2025)

- 288.CEN/WS MODA – Materials modelling terminology, classification and metadata. – URL: https://standards.cen-cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:32:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:2301711,25&cs=14D51DF69C130DE30756158289060995D (дата обращения: 25.02.2025)
- 289.CEN/WS NAN – Materials characterization – terminology and structured documentation. – URL: https://standards.cen-cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:32:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:3480033,25&cs=1C8FAA0576453A13FB43D377741FF9899 (дата обращения: 25.02.2025)
- 290.CEN/CLC/WS DEFACTO – Definition of parameters required for modelling of the material, cell and manufacturing process behaviour for battery cells for the automotive market. – URL: https://standards.cen-cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:32:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:3126218,25&cs=14C5DD821AAC2D5FBE0863EC36F84184E (дата обращения: 25.02.2025)
- 291.British Standards Institution – Search for "Information technology". – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/search/Standards?Term=Information+technology&Source=category> (дата обращения: 26.02.2025)
- 292.British Standards Institution – Information technology – Software. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/categories/35.080> (дата обращения: 26.02.2025)
- 293.IST/15 – Software and systems engineering. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50001772> (дата обращения: 26.02.2025)
- 294.IST/5 – Programming languages, their environments and system software interfaces. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50001786> (дата обращения: 26.02.2025)
- 295.ICT/1 – Information systems co-ordination. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50107177> (дата обращения: 26.02.2025)
- 296.IST/33 – Information security, cybersecurity and privacy protection. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50001780> (дата обращения: 26.02.2025)
- 297.British Standards Institution – Search for "Thermoplastic materials". – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/search/Standards?Term=Thermoplastic+materials&Source=category> (дата обращения: 04.03.2025)
- 298.British Standards Institution – Committee PRI/82 – Thermoplastic materials. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50001451> (дата обращения: 04.03.2025)
- 299.British Standards Institution – Committee PRI/89 – Plastics – Environmental Aspects. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50092402> (дата обращения: 04.03.2025)
- 300.British Standards Institution – Committee PRI/21 – Testing of plastics. – URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/committees/50001411> (дата обращения: 04.03.2025)
- 301.Software & Systems Engineering Standards Committee IEEE. – URL: <https://www.computer.org/volunteering/boards-and-committees/standards-activities/committees/s2esc> (дата обращения: 02.03.2025)

302. IEEE/ISO/IEC 15026-1-2019 Systems and software engineering – Systems and software assurance – Part 1: Concepts and vocabulary. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/15026-1/7155/> (дата обращения: 02.03.2025)
303. IEEE/ISO/IEC 15288-2023 Systems and software engineering – System life cycle processes. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/15288/10424/> (дата обращения: 02.03.2025)
304. IEEE/ISO/IEC 24641-2023 Systems and Software engineering – Methods and tools for model-based systems and software engineering. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24641/10139/> (дата обращения: 02.03.2025)
305. IEEE/ISO/IEC 42010-2022 Software, systems and enterprise – Architecture description. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/42010/6846/> (дата обращения: 02.03.2025)
306. IEEE/ISO/IEC 24774-2021 Systems and software engineering – Life cycle management – Specification for process description. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24774/10126/> (дата обращения: 02.03.2025)
307. DS/ISO/IEC/IEEE 26531 – Systems and software engineering – Content management for product life-cycle, user and service management documentation. – URL: <https://standards.global-spec.com/std/9933562/ds-iso-iec-ieee-26531> (дата обращения: 02.06.2023)
308. CSA ISO/IEC/IEEE 24748-1 – Systems and software engineering – Life cycle management – Part 1: Guidelines for life cycle management. – URL: <https://standards.global-spec.com/std/14224318/csa-iso-iec-ieee-24748-1> (дата обращения: 02.03.2025)
309. CSA ISO/IEC/IEEE 24748-4 – Systems and software engineering – Life cycle management – Part 4: Systems engineering planning. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/10194660/csa-iso-iec-ieee-24748-4> (дата обращения: 02.03.2025)
310. ISO/IEC TS 24748-6 – Systems and software engineering – Life cycle management – Part 6: System integration engineering. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/10057351/iso-iec-ts-24748-6> (дата обращения: 02.03.2025)
311. IEEE/ISO/IEC 12207-2017 Systems and software engineering – Software life cycle processes. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/12207/5672/> (дата обращения: 02.03.2025)
312. ISO/IEC TS 30103 – Software and Systems Engineering – Lifecycle Processes – Framework for Product Quality Achievement. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/9957777/iso-iec-ts-30103> (дата обращения: 02.03.2025)
313. ISO/IEC/IEEE 16085 – Systems and software engineering – Life cycle processes – Risk management. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/14231493/iso-iec-ieee-16085> (дата обращения: 02.03.2025)
314. DS/ISO/IEC/IEEE 24748-3 – Systems and software engineering – Life cycle management – Part 3: Guidelines for the application of ISO/IEC/IEEE 12207 (software life cycle processes). – URL: <https://standards.globalspec.com/std/14339409/ds-iso-iec-ieee-24748-3> (дата обращения: 02.03.2025)
315. IEEE/ISO/IEC 14764-2021 Software engineering – Software life cycle processes – Maintenance. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/14764/7701/> (дата обращения: 02.03.2025)

316. IEEE/ISO/IEC 24748-5-2017 Systems and Software Engineering – Life Cycle Management – Part 5: Software Development Planning. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24748-5/5664/> (дата обращения: 02.03.2025)
317. IEEE/ISO/IEC 29148-2018 Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/29148/6937/> (дата обращения: 02.03.2025)
318. Search IEEE SA for S2ESC. – URL: <https://standards.ieee.org/search/?q=S2ESC&type=%7CStandard> (дата обращения: 26.02.2025)
319. ASTM Committee D20 Subcommittees. – URL: <https://www.astm.org/get-involved/technical-committees/committee-d20/subcommittee-d20> (дата обращения: 05.03.2025)
320. ASTM Committee D20 on Plastics. – URL: <https://www.astm.org/get-involved/technical-committees/committee-d20> (дата обращения: 05.03.2025)
321. ASTM Plastics Standards. – URL: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/plastics-standards.html> (дата обращения: 05.03.2025)
322. ASTM Composite Standards. – URL: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/composite-standards.html> (дата обращения: 05.03.2025)
323. DL 5026-1993 Technical regulation for computer aided design of power engineering. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=DL%205026-1993 (дата обращения: 15.03.2025)
324. GB/T 15751-1995 Technical product documentation – Requirements for computer aided design and drafting – Vocabulary. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2015751-1995 (дата обращения: 15.03.2025)
325. GB/T 14213-2008 The initial graphics exchange specification. – URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT14213-2008> (дата обращения: 15.03.2025)
326. GB/T 26789-2011 Product lifecycle management services specification. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2026789-2011 (дата обращения: 15.03.2025)
327. GB/T 33222-2016 Common technical specifications of PLM for mechanical products. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2033222-2016 (дата обращения: 15.03.2025)
328. GB/T 35119-2017 Specification for data management in product lifecycle. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2035119-2017 (дата обращения: 15.03.2025)
329. DA/T 88-2021 Product data management (PDM) system electronic file filing and electronic file management specification. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=DA/T%2088-2021 (дата обращения: 15.03.2025)
330. GB/Z 18727-2002 Enterprise application PDM implementing specification. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/Z%2018727-2002 (дата обращения: 15.03.2025)

331. GB/T 31054-2014 Computer aided engineering for mechanical products – Finite element numerical calculation – Terminology. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2031054-2014 (дата обращения: 15.03.2025)
332. GB/T 36341.3-2018 Information technology – Information presentation of shape modeling – Part 3: Streaming transmission. – URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT36341.3-2018> (дата обращения: 15.03.2025)
333. 国家标准全文阅读|标准检索 (composite). – URL: https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/std_list?r=0.5273100878546728&page=1&pageSize=50&p.p1=0&p.p2=复合材料&p.p90=circulation_date&p.p91=desc (дата обращения: 03.03.2025)
334. Стандартизация систем автоматизированного проектирования. – URL: <https://sert-service.ru/standartizatsiya-sistem-avtomatizirovannogo-proyektirovaniya/> (дата обращения: 05.03.2025)
335. Технический комитет по стандартизации ТК 700. – URL: <https://vniief.ru/researchdirections/TK700/> (дата обращения: 05.03.2025)
336. Перечень действующих национальных стандартов, разработанных ТК 700. – URL: <https://vniief.ru/researchdirections/TK700/1b493000458b120cbfc8bf3a2e03dfb7> (дата обращения: 05.03.2025)
337. Приказ №1853 от 29.07.2022 «О закреплении документов национальной системы стандартизации за техническим комитетом по стандартизации "Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии" (ТК 700)». – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/346676> (дата обращения: 05.03.2025)
338. ТК-МТК-22 Информационные технологии. – URL: <https://www.cksit-rspp.ru/company/koordiniruemye-organizatsii/tk-mtk-22-informatsionnye-tekhnologii/> (дата обращения: 11.01.2025)
339. Приказ №151 от 26.01.2023 «О закреплении документов национальной системы стандартизации за техническим комитетом по стандартизации "Информационные технологии" (ТК 022)». – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/406443> (дата обращения: 05.03.2025)
340. Росстандарт создал ТК 165 «САПР электроники» на базе ООО «НИИ «АСОНИКА». – URL: <https://asonika-online.ru/news/431/> (дата обращения: 06.03.2025)
341. ТК 165 – Разработка стандартов. – URL: <https://asonika-online.ru/tk165-standard-development/> (дата обращения: 27.02.2025)
342. Управление жизненным циклом высокотехнологичной продукции на основе национальных стандартов. – URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/7753> (дата обращения: 06.03.2025)
343. Опубликованные стандарты – Технический комитет по стандартизации ТК 482. – URL: <https://tk482.ru/ndocs> (дата обращения: 27.02.2025)

344. Технический комитет ТК 459 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий» – ФГБУ «Институт стандартизации». – URL: <https://www.gostinfo.ru/pages/Standardization/tk459> (дата обращения: 06.03.2025)
345. Приказ №3364 от 30.12.2022 «О закреплении документов национальной системы стандартизации за техническим комитетом по стандартизации "Информационная поддержка жизненного цикла изделий" (ТК 459)». – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/397267> (дата обращения: 06.03.2025)
346. Стандарты, разработанные ТК 497. – URL: http://tk497.org/standartyi_razrabotannyye_tk.html (дата обращения: 27.02.2025)
347. О внесении изменений в Перечень документов национальной системы стандартизации, закрепленных за техническим комитетом по стандартизации "Стеклопластики, стекловолокна и изделия из них" (ТК 063), утвержденный приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 марта 2023 года N 679. – URL: <https://law.tks.ru/document/761140> (дата обращения: 27.02.2025)
348. ТК 230 – НИИ Пластмасс. – URL: <https://instplast.ru/ru/tk-230/> (дата обращения: 27.02.2025)
349. Утвержденные стандарты ТК182 – ВИАМ. – URL: <https://viam.ru/uproject> (дата обращения: 27.02.2025)
350. ГОСТ Р 57700.42-2023 Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=4&month=1&year=2024&search=&id=257099&ysclid=m7dg0g0oap306705839> (дата обращения: 27.02.2025)
351. ГОСТ Р 57700.43-2023 Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Верификация программного обеспечения. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=2&month=1&year=2024&search=&id=257031&ysclid=m7dg0xndyn498957871> (дата обращения: 27.02.2025)
352. Перспективный план стандартизации в области передовых производственных технологий на 2025 – 2030 гг. (с изменением N 1, 2, 3, утв. Росстандартом, Минпромторгом России). – URL: <https://legalacts.ru/doc/perspektivnyi-plan-standartizatsii-v-oblasti-pereдовykh-proizvodstvennykh-tekhnologii-na/> (дата обращения: 25.03.2025)
353. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года" | Правительство Республики Крым | Официальный портал. – URL: <https://minek.rk.gov.ru/documents/77bccce-fee7-4cae-b98b-8e3e5fffd454> (дата обращения: 21.04.2025)
354. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.05.2023 № 1315-р <Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года>. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305250050> (дата обращения: 24.08.2023)

355. Национальный проект Новые материалы и химия | Официальный сайт. – URL: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/new-projects/novye-materialy-i-khimiya/> (дата обращения: 24.04.2025)
356. Deagen M., Brinson L., Vaia R., Schadler L. The materials tetrahedron has a “digital twin” // *MRS Bulletin*. – Vol. 47. – Issue 4. – P. 379–388. – ISSN 0883-7694, 1938-1425. – DOI 10.1557/s43577-021-00214-0.
357. Digital twins of materials. – URL: https://www.hereon.de/central_units/joint_lab_materials_design/digital_twin/index.php.en (дата обращения: 24.04.2025)
358. Huber N. A Strategy for Dimensionality Reduction and Data Analysis Applied to Microstructure–Property Relationships of Nanoporous Metals // *Materials*. – 7.04.2021. – Vol. 14. – Issue 8. – Article 1822. – ISSN 1996-1944. – DOI 10.3390/ma14081822.
359. Kalidindi S., Buzzy M., Boyce B., Dingreville R. Digital Twins for Materials // *Frontiers in Materials*. – 16.03.2022. – Vol. 9. – Article 818535. – ISSN 2296-8016. – DOI 10.3389/fmats.2022.818535.
360. Developing and implementing material digital twins. – URL: <https://www.prolabor.si/material-flow-optimisation.html> (дата обращения: 24.04.2025)
361. Digital-Twin-Enhanced Quality Prediction for the Composite Materials / Y. Wang, F. Tao, Y. Zuo, M. Zhang, Q. Qi // *Engineering*. – Vol. 22. – P. 23–33. – ISSN 20958099. – DOI 10.1016/j.eng.2022.08.019.
362. Sheka E. Digital Twins in Graphene Technology // *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*. – 31.03.2023. – Vol. 15. – Issue 1. – P. 59–80. – ISSN 22183000, 24141267. – DOI 10.17725/rensit.2023.15.059.
363. «Росатом» разрабатывает ядерное топливо с помощью цифрового двойника – 24.04.2025. – URL: <https://strana-rosatom.ru/2024/06/16/rosatom-razrabatyvaet-yadernoe-top/> (дата обращения: 24.04.2025)
364. Concept for databased material property description along the process chain press hardening: Implementing the Digital Material Twin and the Digital Material Shadow / J. Wang, H. Naber, M. Ackermann, F. Brasche, A. Gramlich, U. Krupp // *Computational Materials Science*. – Vol. 249. – Article 113666. – ISSN 09270256. – DOI 10.1016/j.commatsci.2025.113666.
365. Димитриенко Ю. И., Соколов А. П. Многомасштабное моделирование упругих композиционных материалов // *Математическое моделирование* : Т. 24.2012. – 5.
366. Грищенко А.И., Игнатович И.А., Петросян О.Л. Оптимизация микроструктуры композиционных материалов с учетом ограничений на их свойства – 2023. – DOI 10.18721/JPM.16307. – URL: <https://physmath.spbstu.ru/en/article/2023.67.07/> (дата обращения: 24.04.2025)
367. Белов Д.А. Гомогенизация и гетерогенизация однонаправленных упругих волокнистых композитов. – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/1817.pdf/view> (дата обращения: 05.05.2025)
368. Соколов А.П., Першин А.Ю., Козов А.В., Кириллов Н.Д. Гомогенизация многоуровневых многокомпонентных гетерогенных структур для определения физико-механических характеристик композиционных материалов – 2018. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gomogenizatsiya-mnogourovnevyyh-mnogokomponentnyh-geterogennyh-struktur-dlya-opredeleniya-fiziko-mehanicheskikh-harakteristik/pdf> (дата обращения: 23.04.2025)

369. Rumor L., Andrade-Campos A. On the need for material model databases: A state-of-the-art review // *Advances in Mechanical Engineering*. – Vol. 14. – Issue 10. – Article 168781322211305. – ISSN 1687-8132, 1687-8140. – DOI 10.1177/16878132221130575.
370. Абгарян К.К. Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения. Монография. Изд-во Макс Пресс, 2017. – 250 с.
371. Shahapure N., Shinde D., Kelkar A. Atomistic modeling and molecular dynamic simulation of polymer nanocomposites for thermal and mechanical property characterization: A review // *AIMS Materials Science*. – 2023. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 249-287. – ISSN 2372-0484. – DOI 10.3934/materials.2023014.
372. Асадчиков В.Е., Ткаль В.А. Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики: сборник материалов Девятого международного научного семинара и Седьмой международной молодежной научной школы-семинара. – Москва : ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 2020. – 162 с. – ISBN 978-5-98769-166-3.
373. Oñate E., Owen R. Computational Plasticity. Computational Methods in Applied Sciences : – Dordrecht : Springer Netherlands, 2007. – 7. – 268 p. – ISBN 978-1-4020-6576-7.
374. A Multiscale Modelling Approach for Estimating the Effect of Defects in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites / K. Antin, A. Laukkanen, T. Andersson, D. Smyl, P. Vilaça // *Materials*. – 12.06.2019. – Vol. 12. – Issue 12. – Article 1885. – ISSN 1996-1944. – DOI 10.3390/ma12121885.
375. LLorca J., González C., Molina-Aldareguía J., López C. Multiscale Modeling of Composites: Toward Virtual Testing ... and Beyond // *JOM*. – Vol. 65. – Issue 2. – P. 215-225. – ISSN 1047-4838, 1543-1851. – DOI 10.1007/s11837-012-0509-8.
376. Дмитриенко Ю.И., Юрин Ю. В., Сборщиков С. В. Многомасштабное моделирование упругопластических композиционных материалов. – 1. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 228 с. – ISBN 978-5-7038-6367-1. – URL: <https://press.bmstu.ru/catalog/item/8294/> (дата обращения: 16.06.2025)
377. Дмитриенко Ю.И. Метод многоуровневой гомогенизации иерархических периодических структур // *Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Естественные науки.* – 2002. – Вып. 1. – С. 58-73.
378. Multiscale simulation of fracture of braided composites via repetitive unit cells / V. Šmilauer, C. Hoover, Z. Bažant, F. Caner, A. Waas, K. Shahwan // *Engineering Fracture Mechanics*. – Vol. 78. – Issue 6. – P. 901-918. – ISSN 00137944. – DOI 10.1016/j.engfracmech.2010.10.013.
379. Goncalves P., Arteiro A., Rocha N. Micro-mechanical analysis of the effect of ply thickness on curing micro-residual stresses in a carbon/epoxy composite laminate // *Composite Structures*. – Vol. 319. – Article 117158. – ISSN 02638223. – DOI 10.1016/j.compstruct.2023.117158
380. Hui X., Xu Y., Zhang W. Multiscale model of micro curing residual stress evolution in carbon fiber-reinforced thermoset polymer composites // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – Vol. 15. – Issue 3. – P. 475-483. – ISSN 2095-0233, 2095-0241. – DOI 10.1007/s11465-020-0590-6.
381. Younes R., Hallal A., Fardoun F., Hajj F. Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials // *Composites and Their Properties* ;; ред. Ning Hu. InTech, 22.08.2012. – ISBN 978-953-51-0711-8. – URL: <http://www.intechopen.com/books/composites-and-their-properties/comparative-review-study-on-elastic-properties-modeling-for-unidirectional-composite-materials> (дата обращения: 25.04.2025)

382. Huang Z. Micromechanical Failure Analysis of Unidirectional Composites // Failure Analysis ;: ред. Zheng-Ming Huang, Sayed Hemeda. IntechOpen, 18.12.2019. – ISBN 978-1-83968-253-7. – URL: <https://www.intechopen.com/books/failure-analysis/micromechanical-failure-analysis-of-unidirectional-composites> (дата обращения: 25.04.2025)
383. Affdl J., Kardos J. The Halpin-Tsai equations: A review // Polymer Engineering & Science. – Vol. 16. – Issue 5. – P. 344-352. – ISSN 0032-3888, 1548-2634. – DOI 10.1002/pen.760160512.
384. Chamis C. Mechanics of Composite Materials: Past, Present and Future – 15.10.1984. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19880008360> (дата обращения: 25.04.2025)
385. Christensen R. A critical evaluation for a class of micro-mechanics models // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – Vol. 38. – Issue 3. – P. 379-404. – ISSN 00225096. – DOI 10.1016/0022-5096(90)90005-0.
386. Hashin Z., Rosen B. The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials // Journal of Applied Mechanics. – 1.06.1964. – Vol. 31. – Issue 2. – P. 223-232. – ISSN 0021-8936, 1528-9036. – DOI 10.1115/1.3629590.
387. Liu L., Huang Z. A Note on mori-tanaka's method // Acta Mechanica Solida Sinica. – Vol. 27. – Issue 3. – P. 234-244. – ISSN 08949166. – DOI 10.1016/S0894-9166(14)60033-1.
388. Huang Z., Zhou Y. Strength of Fibrous Composites. Advanced Topics in Science and Technology in China : – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. – ISBN 978-3-642-22957-2. – URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-22958-9> (дата обращения: 25.04.2025)
389. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 1. САПР и графика. – 2023. – № 8. – С. 42-51. – 25.04.2025. – URL: <https://sapr.ru/article/26589> (дата обращения: 26.11.2024)
390. Digital twins of composite materials / D. Ozhgibesova, A. Borovkov, V. Shtegman, D. Zainullina, S. Asanidze, M. Shulga // XIII International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN'2024 PROCEEDINGS Conference theme Construction materials. Strength and structural mechanics : – Saint-Petersburg : IKP "NP-PRINT", 20.06.2024.
391. Moldex3D – Plastic Injection Molding Simulation Software. – URL: <https://www.moldex3d.com/products/software/moldex3d/> (дата обращения: 20.03.2025)
392. Moldex3D – Plastic Injection Molding Simulation Software – Composite Molding. – URL: <https://www.moldex3d.com/products/moldex3d-composite-molding/> (дата обращения: 20.03.2025)
393. Injection Molding CAE Software – 3D TIMON™. – URL: <https://3dtimon.com/en/> (дата обращения: 20.03.2025)
394. Антария Software. – URL: <https://antaria-soft.ru/#products> (дата обращения: 20.03.2025)
395. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли РФ и внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 6 июня 2020 г. N 1512-р (с изменениями и дополнениями). – URL: <http://government.ru/docs/all/150406/> (дата обращения: 25.04.2025)

ИЗДАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СПБПУ



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





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



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



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



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



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





Тренды и сценарии развития рынка авиационных двигателей, включая двигатели беспилотных летательных аппаратов, в 2023 году. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, 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.

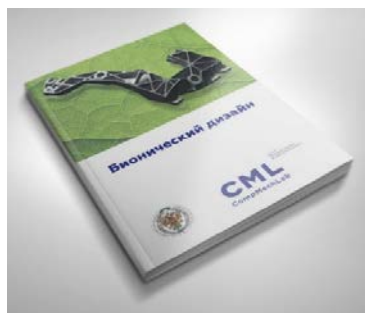


Передовые производственные технологии: возможности для России. Экспертно-аналитический доклад: монография / А.И. Боровков, К.В. Кукушкин, А.А. Корчевская, А.Т. Хуторцова, Л.А. Щербина, Ю.А. Рябов, С.В. Салкуцан, Е.О. Касяненко, И.С. Метревели, К.О. Вишневский, Ю.В. Туровец, М.С. Липецкая, Д.В. Санатов, 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 пр направлению «Технет» СПбПУ (далее – Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ) создан в октябре 2024 года по итогам конкурсного отбора инфраструктурных центров направлений Национальной технологической инициативы (НТИ).

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

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

Достижению поставленной цели способствует выполнение следующих задач:

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



*Боровков Алексей Иванович
Мартынец Екатерина Романовна
Щербина Людмила Александровна
Хуторцова Екатерина Романовна
Рябов Юрий Александрович
Кукушкин Кузьма Викторович
Нездоймышапко Людмила Андреевна
Ожгибесова Дарья Дмитриевна
Чхеидзе Екатерина Павловна
Поняева Ирина Игоревна
Павлова Елизавета Ивановна
Рождественский Олег Игоревич*

**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

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

Подписано в печать 30.06.2025. Формат 60×84/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 17,5. Тираж 500. Заказ 3202.

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.