

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА
ВЕЛИКОГО»

**Информационно-аналитический отчет «Тренды и сценарии
развития рынков, относящихся к «цифровой фабрике» по
направлению «Технет» НТИ в условиях новой экономической
реальности»**

Проректор по цифровой трансформации,
лидер (соруководитель) рабочей группы «Технет»

А. И. Боровков



«22» сентября 2024 г.



ТРЕНДЫ И СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ РЫНКОВ,
ОТНОСЯЩИХСЯ К «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКЕ»
ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ
В УСЛОВИЯХ НОВОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Экспертно-аналитический доклад



Санкт-Петербург

2023

Настоящий экспертно-аналитический доклад подготовлен Инфраструктурным центром «Технет» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого и Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова.

Экспертно-аналитический доклад содержит результаты исследования, посвященного трендам и сценариям развития технологий цифрового проектирования и моделирования, являющихся основой создания Фабрик будущего, в частности цифровых фабрик (Digital Factory). В докладе рассмотрены рынки цифрового проектирования и моделирования, основные барьеры и риски, а также нормативное правовое регулирование развития данной технологической области, национальный и международный нормативно-технический ландшафт в области цифрового проектирования и моделирования. Кроме того, проанализированы ключевые игроки и проекты, основные технологии и разработки на рынке цифрового проектирования и моделирования, а также показатели по компаниям «Технет» НТИ, специализирующихся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования.

На обложке – изображение, созданное на основе запроса «digital factories» с помощью приложения Image Creator от Microsoft Bing, которое позволяет сгенерировать уникальные рисунки по фотографиям и ключевым словам с помощью нейросети.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
ГЛАВА 1. РЫНОК ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ.....	16
1.1. Основные сегменты рынка.....	16
1.2. Емкость рынка / сегмента.....	17
1.3. Темпы роста рынка / сегмента	18
1.4. Жизненный цикл отрасли / рынка, стадия зрелости	22
1.5. Тренды развития цифрового проектирования и моделирования	23
ГЛАВА 2. БАРЬЕРЫ, РИСКИ И НОРМАТИВНОЕ ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РЫНКА ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ.....	29
2.1. Барьеры	29
2.2. Риски	31
2.3. Нормативное правовое регулирование, в том числе анализ государственных программ поддержки по НИРам и НИОКРам	32
2.4. Национальный и международный нормативно-технический ландшафт	39
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ИГРОКИ И ПРОЕКТЫ НА РЫНКЕ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ	49
3.1. Основные игроки: количество, рыночные доли, описание продуктов и разработок	49
3.2. Оценка успешных бизнес-моделей и лучших практик	54
3.3. Инвестиции, сделки M&A, кооперация.....	56
3.4. Новые крупные проекты: участники, планы, суммы привлеченных инвестиций.....	61
3.5. Причины закрытия неудавшихся проектов.....	62
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКИ НА РЫНКЕ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЯМ «ТЕХНЕТ» НТИ.....	65
4.1. Основные технологии, применяемые на рынке.....	65
4.2. Обзор ключевых научных разработок в России и мире по результатам библиометрического и патентного анализа	81
4.3. Технологический радар рынка цифрового проектирования и моделирования.....	102
ГЛАВА 5. ПОКАЗАТЕЛИ ПО КОМПАНИЯМ «ТЕХНЕТ» НТИ, СПЕЦИАЛИЗИРУЮЩИХСЯ НА РАЗРАБОТКЕ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ, ВОВЛЕЧЕННЫМ В РЕАЛИЗАЦИЮ НАПРАВЛЕНИЯ НТИ	107
5.1. Количество компаний НТИ	107

5.2. Показатели по компаниям НТИ, вовлеченным в реализацию направления НТИ: количество компаний НТИ.....	107
5.3. Краткое описание продуктов и услуг компаний НТИ	109
5.4. Объемы выручки от продажи продуктов и услуг компаний НТИ в рамках сегментов направления НТИ.....	111
5.5. Количество компаний НТИ, имеющих экспортную выручку.....	116
5.6. Объем экспортной выручки компаний НТИ.....	117
5.7. Количество прав на РИД, зарегистрированных компаниями НТИ.....	117
5.8. Количество реализуемых проектов по отдельному направлению НТИ.....	119
5.9. Технологический ландшафт рынка, занимаемого компаниями НТИ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	122
Приложение 1. Обзор деятельности международных организаций по нормативно-техническому регулированию.....	122
Приложение 2. Перечень национальных стандартов в области цифрового проектирования и моделирования	129
Приложение 3. Перечень нормативно-технических документов, выделенных в ходе опроса отечественных разработчиков программного обеспечения цифрового проектирования и моделирования. Agile-подход к разработке программного обеспечения.....	136
Приложение 4. Перспективный план стандартизации в области численного моделирования.....	140
Приложение 5. Стартапы в области цифрового проектирования и моделирования	141
Приложение 6. Расшифровка кодов международной патентной классификации.....	146
Приложение 7. Географический анализ компаний	148
Приложение 8. Дайджест ключевых событий по тематике цифрового проектирования и моделирования в рамках направления «Технет» НТИ в мире и в России	150
БИБЛИОГРАФИЯ.....	158

СПИСОК РИСУНКОВ

Рисунок 1. Экономический эффект от внедрения технологий цифровой трансформации в российских организациях (доля, количество респондентов = 37).....	13
Рисунок 2. Ключевые сложности, связанные с переходом российских организаций от использования зарубежных цифровых решений к использованию отечественных цифровых решений (доля, количество респондентов = 37).....	14
Рисунок 3. Распределение респондентов в зависимости от ответа на вопрос: «Если вы пользуетесь отечественными (в т.ч. собственными) системами и решениями, в какой степени их функциональные возможности закрывают ваши потребности?» (доля, количество респондентов = 37)	14
Рисунок 4. Объемы мировых рынков цифрового проектирования и моделирования в 2022 году (млрд долл.).....	18
Рисунок 5. Прогноз развития мирового рынка компьютерного проектирования в 2022–2027 годы (млрд долл.).....	19
Рисунок 6. Прогноз развития мирового рынка компьютерного инжиниринга в 2022–2027 годы (млрд долл.).....	20
Рисунок 7. Прогноз развития мирового рынка суперкомпьютерного инжиниринга в 2022–2027 годы (млрд долл.).....	20
Рисунок 8. Прогноз развития мирового рынка технологической подготовки производства в 2022–2027 годы (млрд долл.).....	21
Рисунок 9. Прогноз развития мирового рынка управления жизненным циклом изделий в 2022–2027 годы (млрд долл.).....	21
Рисунок 10. Сравнение рынков решений в области цифрового проектирования и моделирования	22
Рисунок 11. Объем региональных сегментов рынка компьютерного проектирования в 2022 году (млрд долл.).....	23
Рисунок 12. Основные потребители рынка компьютерного проектирования по отраслям в 2022 году.....	24
Рисунок 13. Объем региональных сегментов рынка компьютерного инжиниринга в 2022 году (млрд долл.).....	24
Рисунок 14. Основные потребители рынка компьютерного инжиниринга по отраслям в 2022 году.....	25
Рисунок 15. Объем региональных сегментов рынка суперкомпьютерного в 2022 году (млрд долл.).....	25
Рисунок 16. Основные потребители рынка суперкомпьютерного инжиниринга по отраслям в 2022 году.....	26
Рисунок 17. Объем региональных сегментов рынка технологической подготовки производства в 2022 году (млрд долл.).....	26

Рисунок 18. Основные потребители рынка технологической подготовки производства по отраслям в 2022 году.....	27
Рисунок 19. Объем региональных сегментов управления жизненным циклом изделий в 2022 году (млрд долл.).....	27
Рисунок 20. Основные потребители рынка технологий управления жизненным циклом изделий по отраслям в 2022 году.....	28
Рисунок 21. Рыночная капитализация / МСАР компаний-лидеров в области цифрового проектирования и моделирования (млн долл.).....	50
Рисунок 22. Выручка компаний-лидеров рынка цифрового проектирования и моделирования в 2020–2022 годы (млрд руб.).....	52
Рисунок 23. Сравнение разработчиков программных систем цифрового проектирования и моделирования по объему выручки, темпам роста выручки за 3 года (2020–2022 годы) и продолжительности существования на рынке	53
Рисунок 24. Основные черты бизнес-моделей организаций, ведущих деятельность в области цифрового проектирования и моделирования	55
Рисунок 25. Количество научных публикаций в мире сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)	82
Рисунок 26. Количество научных публикаций в России в сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)	82
Рисунок 27. Количество научных публикаций в мире в сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №2 (1980–2023 годы)	83
Рисунок 28. Количество научных публикаций в России в сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №2 (1980–2023 годы)	83
Рисунок 29. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по странам по двум запросам (1980–2023 годы).....	84
Рисунок 30. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в мире согласно Запросу №1 (1980–2023 годы).....	85
Рисунок 31. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в мире согласно Запросу №2 (б) (1980–2023 годы).....	85
Рисунок 32. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в России согласно Запросу №1 (1980–2023 годы).....	86
Рисунок 33. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в России согласно Запросу №1 (1980–2023 годы).....	86
Рисунок 34. Результаты анализа направлений исследовательских работ в научной среде	

цифрового проектирования и моделирования.....	88
Рисунок 35. Количество поданных заявок на получение патента в сфере CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM по годам (1980–2022 годы).....	91
Рисунок 36. Количество патентов в сфере CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM по патентным агентствам стран (1980–2022 годы).....	92
Рисунок 37. Динамика количества заявок на получение патента по миру (1980–2022 годы).....	93
Рисунок 38. Динамика количества заявок на выдачу патентов по России (1980–2022 годы).....	93
Рисунок 39. Количество зарегистрированных патентов по компаниям по миру (1980–2022 годы).....	94
Рисунок 40. Количество зарегистрированных патентов по компаниям по России (1980–2022 годы).....	95
Рисунок 41. Динамика количества полученных компаниями патентов, которые возможно отнести к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования (единиц, 1985–2022 годы).....	97
Рисунок 42. Динамика количества полученных компаниями патентов в области CAD (1985–2022 годы).....	98
Рисунок 43. Динамика количества полученных компаниями патентов в области CAE/ HPC (1980–2022 годы).....	99
Рисунок 44. Динамика количества полученных компаниями патентов в области CAM (1991–2022 годы).....	100
Рисунок 45. Анализ временной динамики получения компаниями патентов, соответствующих PDM/ PLM (единиц, 1980–2022 годы).....	101
Рисунок 46. Технологический радар технологий цифрового проектирования и моделирования.....	103
Рисунок 47. Общая выручка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2021 год).....	108
Рисунок 48. Средняя выручка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2021 год).....	109
Рисунок 49. Динамика общей выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017–2021 годы).....	113
Рисунок 50. Динамика общей выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017–2022 годы).....	114
Рисунок 51. Динамика средней выручки компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового	

проектирования и моделирования (млн руб., 2017 и 2021 годы).....	114
Рисунок 52. Динамика средней выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017–2022 годы).....	115
Рисунок 53. Сравнение общей выручки рассмотренных компаний, осуществляющих экспорт, и их экспортной выручки по технологиям (млн руб., 2019 год).....	116
Рисунок 54. Технологический ландшафт цифрового проектирования и моделирования.....	120
Рисунок 55. Структура стандартов в области цифровых двойников.....	128
Рисунок 56. Средняя выручка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, по субъекту Российской Федерации (млн руб., 2021 год).....	149

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1. Оценка значимости технологий для цифровой трансформации российских организаций (% , количество респондентов = 37)	12
Таблица 2. Оценка эффекта от применения технологий цифровой трансформации на разных стадиях жизненного цикла изделий в российских организациях (% , количество респондентов = 37).....	12
Таблица 3. Рынки решений в области цифрового проектирования и моделирования.....	16
Таблица 4. Сделки слияния и поглощения среди ведущих игроков рынка цифрового проектирования и моделирования	57
Таблица 5. Характеристика CAD-систем.....	66
Таблица 6. Характеристика CAE-систем	69
Таблица 7. Характеристика HPC-систем.....	72
Таблица 8. Характеристика PDM-систем.....	76
Таблица 9. Характеристика PLM-систем	78
Таблица 10. Сравнение Запросов №1 и №2 по темпу прироста количества публикаций и наибольшему количеству публикаций в год (2013–2022 годы).....	84
Таблица 11. Количество патентов компаний, которые возможно отнести к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования.....	96
Таблица 12. Количество зарегистрированных компаниями патентов.....	98
Таблица 13. Количество зарегистрированных компаниями патентов.....	99
Таблица 14. Количество зарегистрированных компаниями патентов.....	100
Таблица 15. Количество зарегистрированных компаниями патентов.....	101
Таблица 16. Компании, разрабатывающие системы цифрового проектирования и моделирования, перечень их решений и количество РИД.....	109
Таблица 17. Объем выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования.....	111
Таблица 18. Перечень компаний направления «Технет» НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, имеющих экспортную выручку (2019 год).....	116
Таблица 19. Объем выручки от продажи на внешний рынок решений/ ПО компаний направления «Технет» НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования.....	117
Таблица 20. Количество зарегистрированных РИД компаниями направления «Технет» НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, с разделением по классам ПО	118
Таблица 25. Перспективный план стандартизации в области передовых производственных технологий на 2018–2025 годы (с изменениями №1, №2) в области	

численного моделирования.....	140
Таблица 26. Успешные стартапы в области цифрового проектирования и моделирования в 2022 году.....	141
Таблица 27. Расшифровка кодов международной патентной классификации.....	146
Таблица 28. Распределение компаний, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, по регионам (единицы)	148
Таблица 29. Средняя выручка рассмотренных компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, по субъекту Российской Федерации (млн руб., 2021 год)	148

ВВЕДЕНИЕ

Экспертно-аналитический доклад «Тренды и сценарии развития рынков, относящихся к «цифровой фабрике» по направлению «Технет» НТИ в условиях новой экономической реальности» подготовлен Инфраструктурным центром «Технет» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого (ИЦ «Технет» СПбПУ) в партнерстве с Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Экспертно-аналитический доклад содержит результаты комплексного изучения особенностей развития технологий цифрового проектирования и моделирования, которые являются основой создания Фабрик будущего¹, в частности цифровых фабрик (Digital Factory). Формирование Фабрик будущего является одной из ключевых целей кросс-отраслевого и кросс-рыночного направления «Технет» НТИ. Цифровые фабрики представляют собой системы комплексных технологических решений, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения от стадии исследования и планирования, когда закладываются базовые принципы изделия, и заканчивая созданием цифрового макета (Digital Mock-Up, DMU), «цифрового двойника» (Smart Digital Twin), опытного образца или мелкой серии («безбумажное производство», «всё в цифре»).

Под технологиями цифрового проектирования и моделирования понимается совокупность следующих технологий:

- компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD);
- компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE и High-Performance Computing, HPC);
- технологической подготовки производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM);
- управления данными об изделии (Product Data Management, PDM) и управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM).

В условиях цифровой трансформации различных секторов экономики и, в частности, производственного сектора, применение технологий цифрового проектирования и моделирования демонстрирует высокую эффективность, позволяя успешно решать более амбициозные задачи в кратчайшие сроки. На сегодняшний день вряд ли возможно представить успешно функционирующее высокотехнологичное предприятие, не использующее цифровые технологии, по крайней мере, на некоторых стадиях цепочки создания добавленной стоимости.

Значимость технологий цифрового проектирования и моделирования в процессе реализации цифровой трансформации российских организаций подтверждают результаты опроса² представителей

¹ Фабрики Будущего – это определенный тип системы бизнес-процессов, способ комбинирования бизнес-процессов, который позволит создавать цифровые платформы, или экосистемы передовых цифровых технологий, разрабатывать системы цифровых моделей как новых проектируемых изделий, так и производственных процессов, содействовать цифровизации всего жизненного цикла изделий (от концепт-идеи, проектирования, производства, эксплуатации, сервисного обслуживания и до утилизации).

² В рамках подготовки доклада в мае-июне 2023 года был проведен опрос среди представителей различных отраслей, в том числе – машиностроения (авиационной промышленности, автомобильной промышленности, судостроения и т.д.); оборонно-промышленного комплекса (ОПК); IT-сферы, разработки программных продуктов; горно-металлургического

различных отраслей, проведенного в рамках подготовки данного доклада. Также к значимым технологиям респонденты отнесли цифровые платформенные решения и искусственный интеллект.

Таблица 1. Оценка значимости технологий для цифровой трансформации российских организаций (% , количество респондентов = 37)

Группа технологий	Уровень потенциальной значимости технологий				
	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий	Затрудняюсь ответить
Цифровое проектирование и моделирование	45,9	32,4	8,1	5,4	8,1
Цифровые платформенные решения	16,2	43,2	27	8,1	5,4
Цифровые двойники	13,5	27	35,1	13,5	10,8
Искусственный интеллект	21,6	32,4	27	18,9	0
Расширенная реальность	2,7	16,2	32,4	43,2	5,4
Большие данные	18,9	24,3	27	24,3	5,4
Промышленный интернет вещей	8,1	27	27	29,7	8,1
Беспроводная связь	10,8	37,8	32,4	13,5	5,4
Промышленная робототехника	5,4	29,7	29,7	27	8,1
Квантовые технологии	8,1	10,8	16,2	40,5	24,3
Облачные технологии	2,7	37,8	32,4	21,6	5,4
Цифровые технологии управления бизнес-процессами	24,3	27	27	16,2	5,4
Решения для беспилотного управления	5,4	13,5	21,6	48,6	10,8
Аддитивное производство и новые материалы	10,8	37,8	16,2	21,6	13,5

Источник: ИАФЦ СПбПУ, 2023

Наибольший эффект от применения технологий респонденты отметили на этапе проектирования изделия.

Таблица 2. Оценка эффекта от применения технологий цифровой трансформации на разных стадиях жизненного цикла изделий в российских организациях (% , количество респондентов = 37)

Стадия жизненного цикла изделия	Эффект от применения технологий					
	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий	Технологии не применяются	Затрудняюсь ответить
Концептуальная разработка изделия	13,5	43,2	18,9	16,2	2,7	5,4
Проектирование изделия	29,7	48,6	10,8	2,7	2,7	5,4

комплекса, нефтегазовой промышленности, энергетики (включая атомную энергетику). Полная версия результатов опроса представлена в приложении к экспертно-аналитическому докладу «Тренды и сценарии развития рынков решений в области цифровой трансформации промышленных компаний в рамках направления «Технет» НТИ в 2023 году».

Стадия жизненного цикла изделия	Эффект от применения технологий					
	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий	Технологии не применяются	Затрудняюсь ответить
Производство опытных образцов и проведение испытаний	13,5	43,2	24,3	5,4	5,4	8,1
Подготовка серийного производства	10,8	37,8	21,6	10,8	8,1	10,8
Серийное производство	10,8	24,3	21,6	16,2	10,8	16,2
Эксплуатация	5,4	18,9	27	18,9	8,1	21,6
Сервисное обслуживание	8,1	16,2	24,3	18,9	8,1	24,3

Источник: ИАФЦ СПбПУ, 2023

Ключевой экономический эффект от применения технологий цифровой трансформации по оценкам абсолютного большинства респондентов заключается в сокращении времени на разработку / производство продукции. Более половины респондентов отмечают сокращение финансовых затрат на разработку / производство продукции и увеличение прозрачности бизнес-процессов.

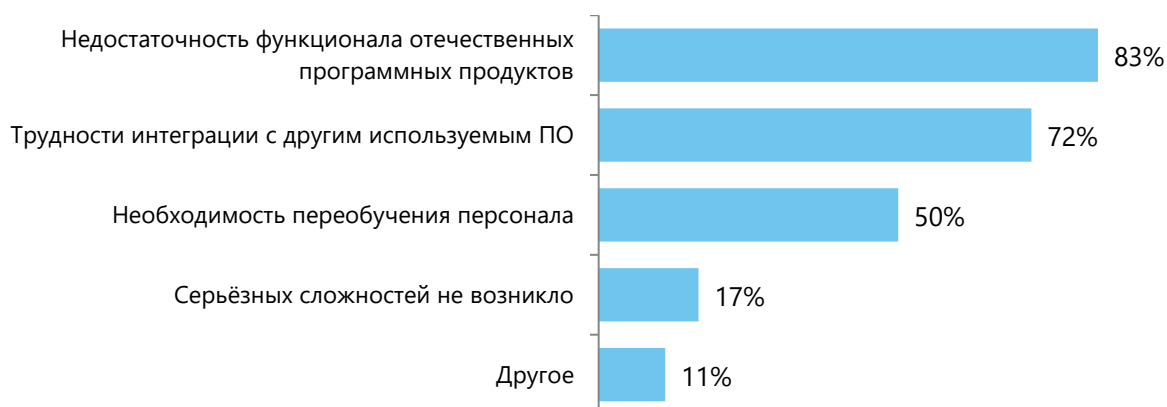
Рисунок 1. Экономический эффект от внедрения технологий цифровой трансформации в российских организациях (доля, количество респондентов = 37)



Источник: ИАФЦ СПбПУ, 2023

В связи с санкционными ограничениями на приобретение зарубежного программного обеспечения около 48% опрошенных организаций столкнулись с необходимостью перехода на российские программные решения. При этом респонденты отметили ряд сложностей, связанных с переходом на отечественное ПО: недостаточность функциональных возможностей отечественных программных продуктов и трудности интеграции с другим используемым ПО. Кроме того, по оценкам половины респондентов, затруднения представляет необходимость переобучения персонала.

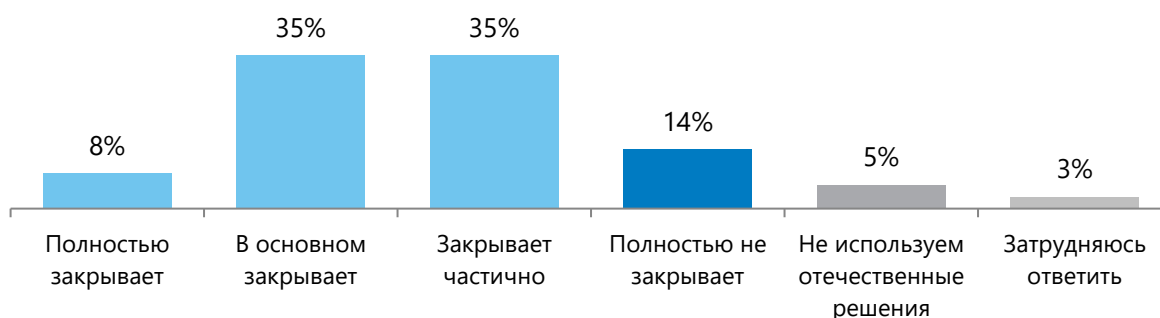
Рисунок 2. Ключевые сложности, связанные с переходом российских организаций от использования зарубежных цифровых решений к использованию отечественных цифровых решений (доля, количество респондентов = 37)



Источник: ИАФЦ СПбПУ, 2023

В то же время 70% опрошенных лояльно относятся к временной ограниченности функциональных возможностей отечественных систем, понимая перспективы их развития.

Рисунок 3. Распределение респондентов в зависимости от ответа на вопрос: «Если вы пользуетесь отечественными (в т.ч. собственными) системами и решениями, в какой степени их функциональные возможности закрывают ваши потребности?» (доля, количество респондентов = 37)



Источник: ИАФЦ СПбПУ, 2023

Тенденция развития технологических решений, в том числе технологий цифрового проектирования и моделирования, разрабатываемых внутри государств и востребованных национальными компаниями, наблюдается во многих странах. Глобальные политические и экономические изменения подтолкнули государства к пересмотру технологических приоритетов, сфокусировав меры

поддержки на разработке, производстве и применении преимущественно собственных технологий с целью обеспечения независимости от поставщиков из других стран.

Помимо обзора актуальных тенденций в рамках данного доклада представлен анализ рынка цифрового проектирования и моделирования. Ключевые показатели развития и оценка стадии зрелости рынка представлены в первой главе доклада.

Во второй главе особое внимание уделено барьерам и рискам развития рынка технологий цифрового проектирования и моделирования, а также приведены результаты обзора основных направлений мировых и отечественных государственных программ поддержки научных исследований и разработок в рассматриваемой области и представлен национальный и международный нормативно-технический ландшафт.

В третьей главе представлено описание деятельности основных игроков на рынке технологий цифрового проектирования и моделирования, рассмотрены бизнес-модели финансовые стратегии, а также проекты в области цифрового проектирования и моделирования, реализуемые организациями-лидерами.

Четвертая глава доклада содержит обзор основных технологий и разработок в области цифрового проектирования и моделирования, а также результаты библиометрического и патентного анализа разработок в мире и в России, на основании которых сформирован технологический радар рынка технологий цифрового проектирования и моделирования.

В пятой главе представлен анализ показателей по компаниям «Технет» НТИ, специализирующихся на разработке решений в области технологий цифрового проектирования и моделирования, а также сформирован технологический ландшафт рынка, занимаемого компаниями НТИ.

Таким образом, каждая из пяти глав доклада отражает определенные аспекты развития рынка технологий цифрового проектирования и моделирования.

ГЛАВА 1. РЫНОК ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ

Глава подготовлена ИЦ «Технет» СПбПУ

В данной главе представлен комплексный обзор мировых рынков цифрового проектирования и моделирования, уровень развития которых является важным показателем, определяющим перспективы развития направления «Технет» НТИ. В рамках проведенного исследования под мировым рынком технологии подразумевается международная сфера торговли, связанная с систематическими операциями по купле-продаже технологических решений [1].

Глава содержит подробное описание сегментов мирового рынка цифрового проектирования и моделирования, подлежащих всестороннему анализу в ходе подготовки экспертно-аналитического доклада. Фокус исследования был сосредоточен на описании таких характеристик сегментов рынка цифрового проектирования и моделирования как объем, темпы роста и ключевые тренды развития в мире по итогам 2022 года и в среднесрочной перспективе до 2027 года, а также анализе жизненного цикла данных сегментов.

1.1. Основные сегменты рынка

Настоящий раздел посвящен описанию сегментов рынка решений в области цифрового проектирования и моделирования, рассмотренных в экспертно-аналитическом докладе. В рамках данного исследования в качестве основных сегментов были определены рынки технологий, сформированных вокруг «сквозных» технологий направления «Технет».

Таблица 3. Рынки решений в области цифрового проектирования и моделирования

Рынок	Ключевая технология
Рынок компьютерного проектирования (Computer-Aided Design Market, CAD-Market)	Компьютерное проектирование (Computer-Aided Design, CAD) подразумевает процесс разработки 3D-моделей в CAD-системах. CAD-системы представляют собой программные системы компьютерного проектирования, позволяющие на основе 3D-моделей осуществлять создание чертежей и / или оформление конструкторской и / или технологической документации.
Рынок компьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering Market, CAE-Market)	Компьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE) определяется как совокупность методов и средств решения научно-технических проблем путем математического и компьютерного моделирования на основе CAE-систем. CAE-системы – это программные системы компьютерного инжиниринга, позволяющие на основе математических моделей разных классов и уровней сложности (в самых общих случаях, описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных) исследовать поведение материалов, физико-механических и технологических процессов, машин и конструкций.
Рынок суперкомпьютерного инжиниринга (High Performance Computing Market, HPC-Market)	Суперкомпьютерный инжиниринг (High Performance Computing, HPC) представляет собой совокупность методов и средств решения научно-технических проблем путем математического и суперкомпьютерного моделирования на основе CAE-систем и высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров, кластеров и т.д., построенных, как правило, на эффективно сочетании CPU- и GPU-процессоров), позволяющих эффективно реализовать подход одновременного /

Рынок	Ключевая технология
	параллельного решения нескольких вариантов задач или разных задач из различных отраслей промышленности.
Рынок технологической подготовки производства (Computer-Aided Manufacturing Market, CAM-Market)	Технологическая подготовка производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM) представляет собой процесс проектирования обработки изделий на оборудовании с числовым программным управлением (далее – ЧПУ) (фрезерных, сверлильных, токарных, шлифовальных, эрозионных, пробивных и других станках) при помощи САМ-систем. САМ-системы являются программными системами технологической подготовки производства, позволяющими на основе 3D-моделей, полученных из САД-систем, осуществлять разработку управляющих программ для изготовления изделий на оборудовании с ЧПУ.
Рынок управления данными об изделии (Product Data Management Market, PDM-Market)	Управление данными об изделии (Product Data Management, PDM) – это организационно-техническая система, обеспечивающая управление всей информацией об изделии. При этом в качестве изделий могут рассматриваться различные сложные технические объекты (корабли и автомобили, самолеты и ракеты, компьютерные сети и др.). PDM-системы являются неотъемлемой частью PLM-систем. Одной из целей PDM-систем является обеспечение возможности групповой работы над проектом, то есть просмотра в реальном времени и совместного использования общих информационных ресурсов предприятия.
Рынок управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management Market, PLM-Market)	Управление жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM) – это стратегический подход к ведению бизнеса, при котором используется набор совместимых решений для поддержки общего (collaborative) представления информации о продукте в процессе его разработки, производства и эксплуатации, в среде расширенного (extended) предприятия – начиная от концепции создания продукта и заканчивая его утилизацией – при интеграции человеческих ресурсов, производственных процессов и информации.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

1.2. Емкость рынка / сегмента

Настоящий раздел посвящен одному из таких ключевых показателей развития рынка, как объем. В рамках исследования, представленного в экспертно-аналитическом докладе, объем (размер) рынка обозначает прикладной показатель, отражающий фактические продажи товаров или услуг на определенной территории за определенный период времени [1]. Фокус исследования сосредоточен на оценке фактического объема ключевых рынков цифрового проектирования и моделирования на мировом уровне по итогам 2022 года.

По итогам 2022 года объем мирового **рынка компьютерного проектирования** был оценен экспертами аналитических компаний The Business Research Company и Research and Markets примерно в 10 млрд долл., а аналитиками компании Market Research Future – в 11,2 млрд долл. [2–4]. Данные показатели позволяют оценить среднее значение объема рынка компьютерного проектирования в 10,4 млрд долл., что превышает аналогичный показатель 2021 года на 4% [5–7].

К концу 2022 года объем мирового **рынка компьютерного инжиниринга** по оценкам таких аналитических агентств, как Research and Markets, IMARC Group и Grand View Research, достиг отметки в 9,3 млрд долл. [8–10]. Среднее значение объема рынка составляет 9,26 млрд долл., что на 22% превышает данный показатель за 2021 год [11–13].

Согласно оценкам экспертов компаний Market Research Future, IMARC Group и Grand View Research, объем мирового **рынка суперкомпьютерного инжиниринга** в конце 2022 года составил от 39,14 до 48,51 млрд долл. [14–16]. Среднее значение объема данного рынка равно 42,61 млрд долл., что превосходит аналогичный показатель 2021 года примерно на 11% [17–19].

Объем мирового **рынка технологической подготовки производства** по итогам 2022 года составил от 3,14 до 3,24 млрд долл., согласно оценкам таких аналитических компаний, как EnterpriseAppsToday, Skyquest и ReportLinker. Среднее значение объема рынка совпадает с прогнозами, сделанными аналитическими агентствами в 2021 году, и составляет 3,19 млрд долл. [20–23]. С 2021 по 2022 год прирост объема данного рынка составил примерно 8,5% [24–26].

По оценкам аналитических агентств Prescient & Strategic Intelligence, Vantage Market Research и Research and Markets, по итогам 2022 года объем мирового **рынка управления жизненным циклом изделий** варьировался в пределах от 28,16 до 35,37 млрд долл. [27–29]. Таким образом, среднее значение объема рынка достигло отметки в 31,7 млрд долл. в 2022 году, что превышает показатель 2021 года на 9% [30–32].

Рынок управления данными об изделии остается сравнительно малоизученным. Согласно последним данным, опубликованным консалтинговой компанией Dataintel, в 2018 году объем мирового рынка управления данными об изделии оценивался в 1,5 млрд долл. [33]. По оценке экспертов компании Regional Research Reports, в 2022 году стоимость одной единицы программного обеспечения управления данными об изделии варьировалась в пределах 200–1500 долл. в год [34].

Рисунок 4. Объемы мировых рынков цифрового проектирования и моделирования в 2022 году (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

1.3. Темпы роста рынка / сегмента

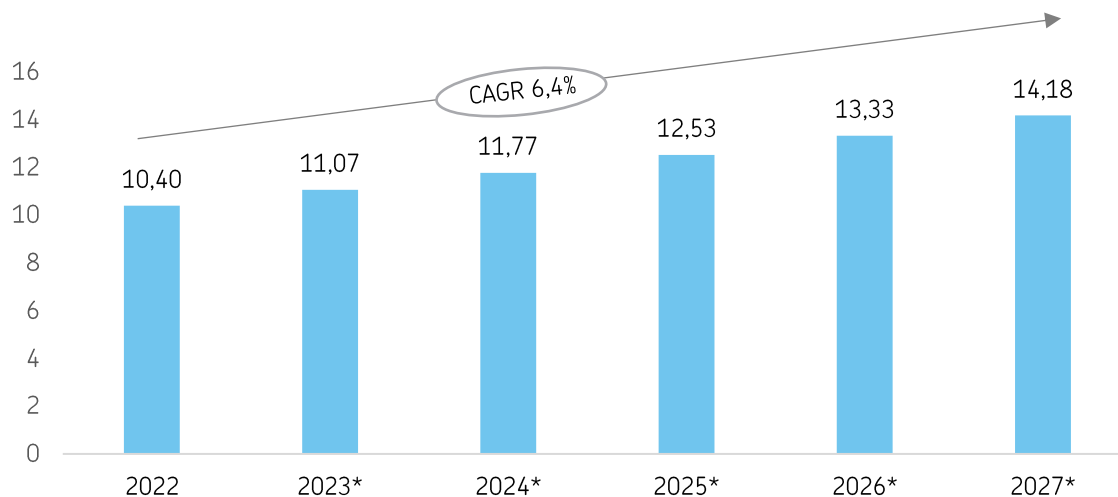
Настоящий раздел посвящен анализу такого важного показателя, отражающего динамику и направление развития рынка, как темпы роста. В рамках исследования, представленного в

экспертно-аналитическом докладе, под темпом роста рынка понимается отношение объема рынка в текущем временном периоде к его объему в прошедшем временном периоде.

В данном разделе приведены оценки совокупного среднегодового темпа роста (Compound annual growth rate, CAGR), выражаемого в процентах и показывающего, на сколько процентов за год прирастает изучаемый параметр. Фокус исследования сосредоточен на оценке фактических совокупных среднегодовых темпов роста рассматриваемых рынков цифрового проектирования и моделирования в мире в период с 2021 по 2022 год и прогнозируемых совокупных среднегодовых темпов роста данных сегментов в период с 2022 по 2027 годы.

Совокупный среднегодовой темп роста мирового **рынка компьютерного проектирования** в период 2021–2022 годов составил 4% [2–4], что на 2% ниже ранее прогнозируемого на данный временной промежуток [2–4]. На период 2022–2027 годов аналитики компаний Business Research Company, Research and Markets и Market Research Future прогнозируют темп роста рынка компьютерного проектирования на уровне 6,2–6,6%. Ожидается, что при указанном темпе роста к концу прогнозируемого периода объем мирового рынка компьютерного проектирования будет варьироваться в пределах от 13,8 до 15,11 млрд долл. [2–4]. Таким образом, при среднем значении темпа роста в 6,4% среднее значение объема данного мирового рынка будет составлять 14,18 млрд долл. в 2027 году.

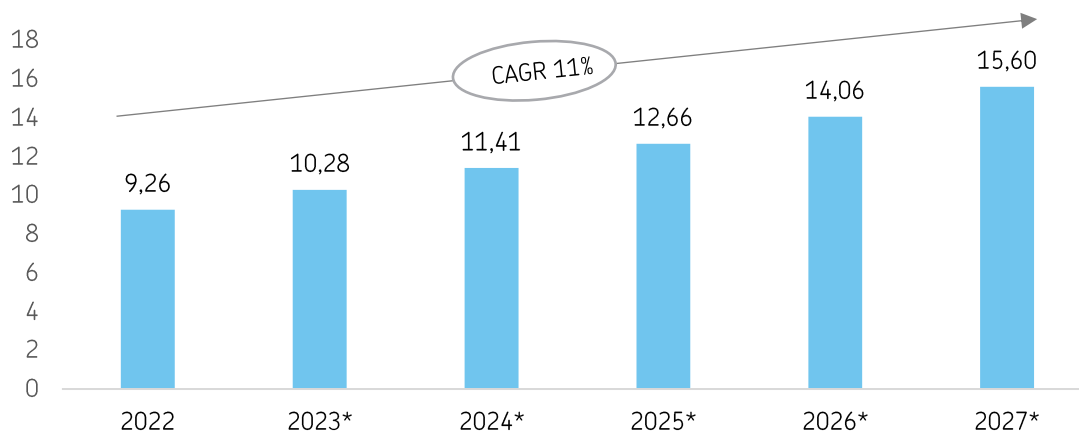
Рисунок 5. Прогноз развития мирового рынка компьютерного проектирования в 2022–2027 годы (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

Среднегодовой темп роста мирового **рынка компьютерного инжиниринга** в период с 2021 по 2022 год составил 22% [8–10], что существенно превысило прогнозировавшиеся на данный временной промежуток значения [8–10]. Эксперты аналитических компаний Research and Markets, Imarc и Grand View Research ожидают, что объем мирового рынка компьютерного проектирования будет находиться в пределах от 15,05 до 16,58 млрд долл. в 2027 году. Данное значение будет достигнуто при среднегодовых темпах роста от 10,1% до 12,6% в 2022–2027 годы [8–10]. Таким образом, среднее значение объема рынка в 2027 году будет составлять 15,6 млрд долл. при среднем значении темпа роста, равном 11% в указанном периоде.

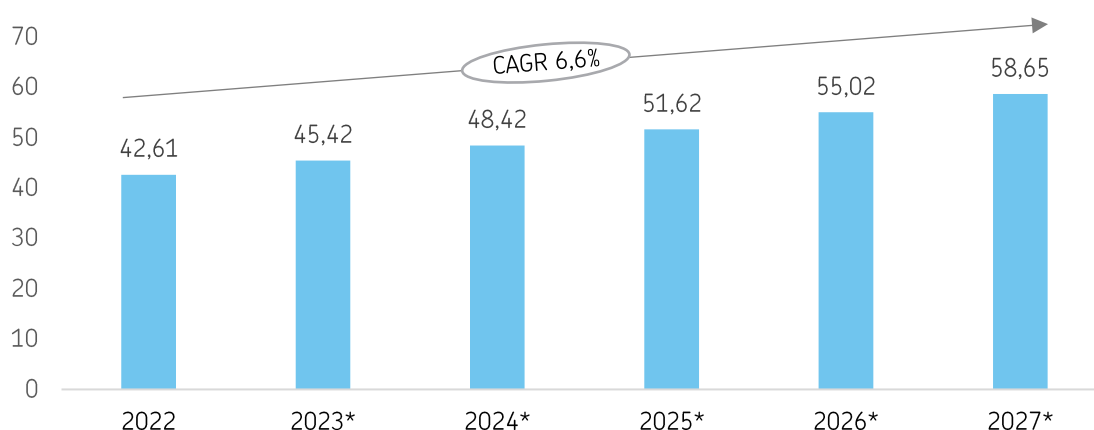
Рисунок 6. Прогноз развития мирового рынка компьютерного инжиниринга в 2022–2027 годы (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

В период с 2021 по 2022 год совокупный среднегодовой темп роста мирового **рынка суперкомпьютерного инжиниринга** составил 11% [14–16], что в 1,5 раза выше прогнозирувавшихся значений [14–16]. Исследователи компаний Market Research Future, Imarc и Grand View Research ожидают, что объем мирового рынка суперкомпьютерного инжиниринга составит от 52,04 до 69,64 млрд долл. в 2027 году при темпах роста в пределах от 5,3 до 7,5% в 2022–2027 годы [14–16]. Таким образом, среднее значение объема рынка в 2027 году будет составлять 58,65 млрд долл. при среднем значении темпа роста, равном 6,6% в указанном периоде.

Рисунок 7. Прогноз развития мирового рынка суперкомпьютерного инжиниринга в 2022–2027 годы (млрд долл.)

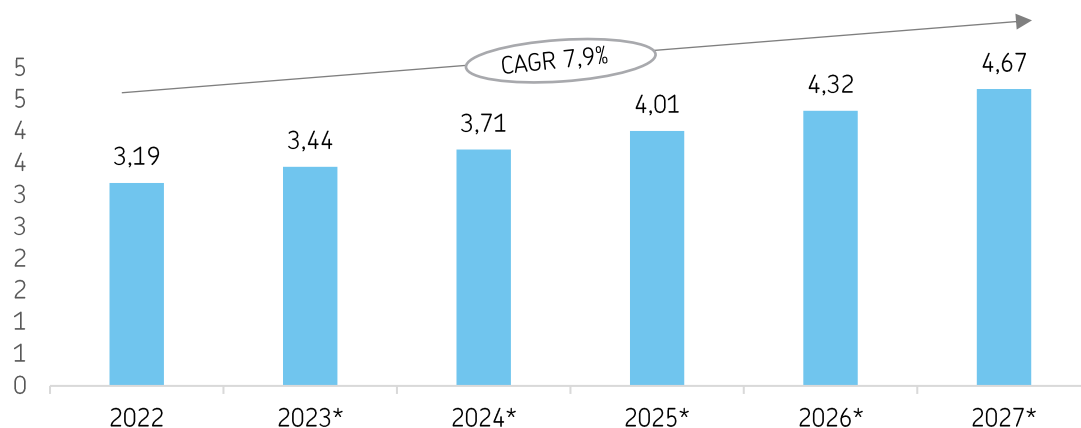


Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

В период с 2021 по 2022 год значение среднегодового темпа роста мирового **рынка технологической подготовки производства** составило 8,5% [20–23], приблизительно равное прогнозируемому значению [20–23]. Эксперты компаний Maximize Market Research, EnterpriseAppsToday и SkyQuest ожидают, что объем рынка технологической подготовки производства составит от 4,53 до 5,06 млрд долл. к концу 2027 года при совокупном среднегодовом темпе роста,

варьирующемся в пределах от 6,52 до 9,6% в период с 2022 по 2027 год [20–22]. Таким образом, среднее значение объема рынка в 2027 году будет составлять 4,67 млрд долл. при среднем значении темпа роста, равном 7,9% в указанном периоде.

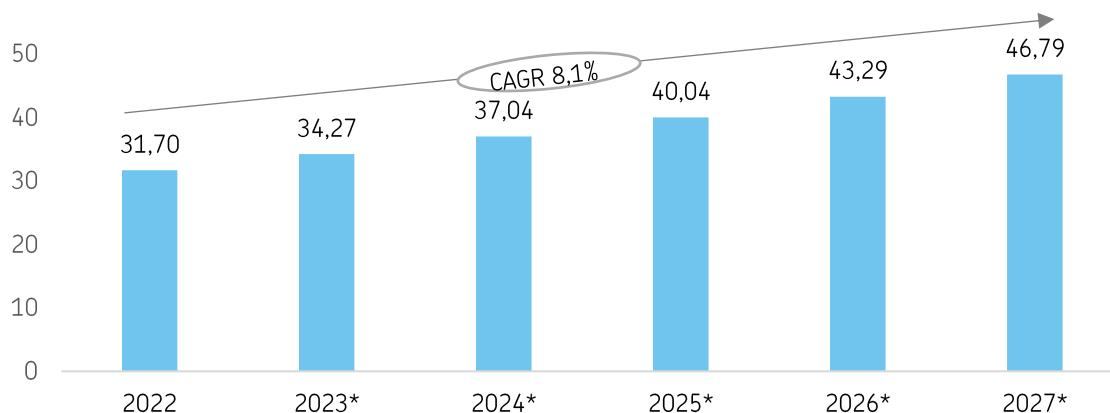
Рисунок 8. Прогноз развития мирового рынка технологической подготовки производства в 2022–2027 годы (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

Значение среднегодового темпа роста мирового **рынка управления жизненным циклом изделий** в 2021–2022 годы составило 9% [27–29], что соответствует прогнозам на данный временной промежуток [27–29]. Эксперты аналитических компаний P&S Intelligence, Vantage Market Research и Research and Markets ожидают, что объем мирового рынка управления жизненным циклом изделий будет находиться в пределах от 41,95 до 51,73 млрд долл. в 2027 году. Данное значение будет достигнуто при среднегодовых темпах роста от 7,9% до 8,3% в 2022–2027 годы [27–29]. Таким образом, среднее значение объема рынка в 2027 году будет составлять 46,79 млрд долл. при среднем значении темпа роста, равном 8,1% в указанном периоде.

Рисунок 9. Прогноз развития мирового рынка управления жизненным циклом изделий в 2022–2027 годы (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

Как было отмечено ранее, **рынок управления данными об изделии** является мало изученным. В соответствии с последними данными, полученными в 2018 году консалтинговой компанией

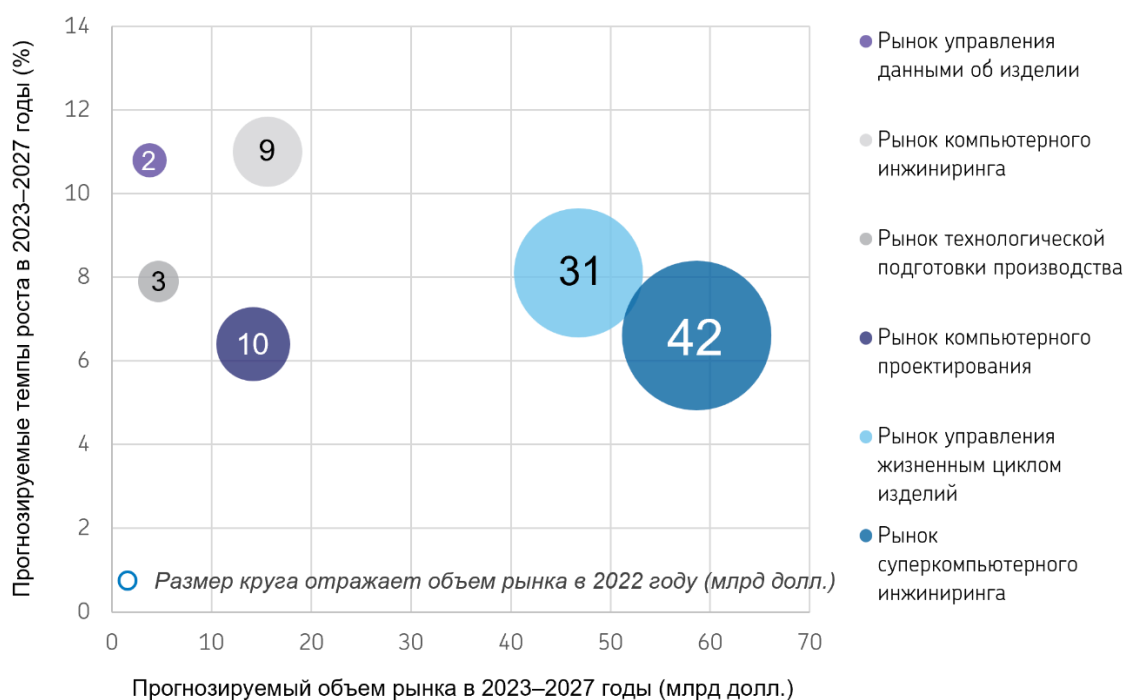
Dataintel, совокупный среднегодовой темп роста мирового рынка управления данными об изделии прогнозировался на уровне 10,8% в период с 2019 по 2028 год [33].

1.4. Жизненный цикл отрасли / рынка, стадия зрелости

Настоящий раздел посвящен описанию жизненного цикла рынков решений в области цифрового проектирования и моделирования, рассмотренных в экспертно-аналитическом докладе. В рамках проведенного исследования под жизненным циклом рынка подразумевается последовательность стадий развития, через которые проходит рынок с течением времени.

В ходе исследования выявление стадий зрелости рынков осуществлялось на основе анализа данных об объемах и темпах роста соответствующих рынков (подробно описанных в разделах 1.2 и 1.3). По состоянию на конец 2022 года рынок суперкомпьютерного инжиниринга и рынок управления жизненным циклом изделий лидировали по объему среди других рынков цифрового проектирования и моделирования. При этом, согласно прогнозным оценкам, данные рынки продемонстрируют сравнительно низкие темпы роста в период до 2027 года. Наиболее быстрорастущими рынками в среднесрочной перспективе станут рынки компьютерного инжиниринга и управления данными об изделии.

Рисунок 10. Сравнение рынков решений в области цифрового проектирования и моделирования³



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

³ Оценка объема и темпов роста рынка управления данными об изделии является приблизительной, рассчитанной на основе последних полученных данных по состоянию на 2018 год.

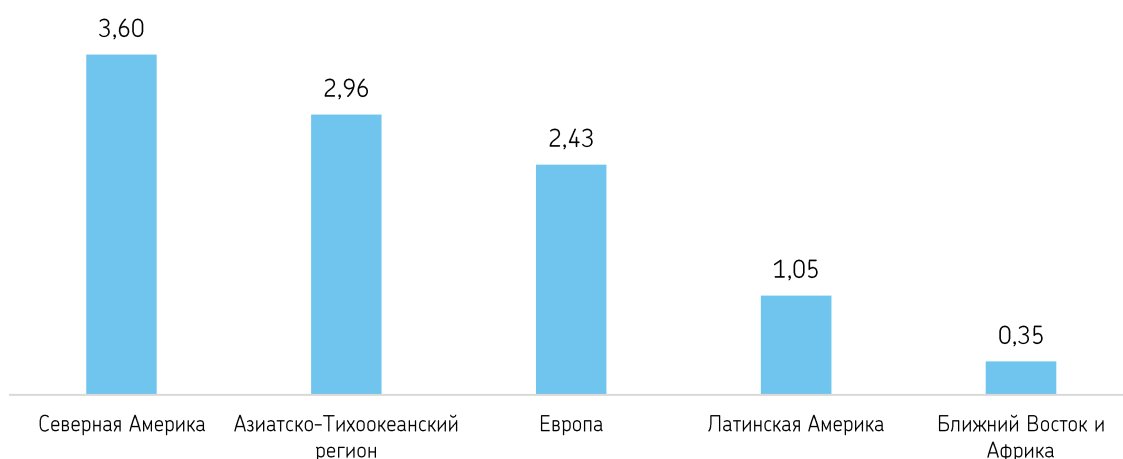
Кроме того, в анализе были учтены показатели деятельности компаний-лидеров в рамках исследуемых рынков (рассмотренные в главе 3), а также результаты патентного анализа (представленные в главе 4). На основе совокупности описанных параметров, можно отметить, что в соответствии с моделью жизненного цикла (industry life-cycle model), предложенной институтом CFA (Chartered Financial Analyst Institute), рынки цифрового проектирования и моделирования находятся в стадии зрелости, характерными чертами которой являются сравнительно медленные темпы роста, консолидация рынка, а также значительные барьеры для входа на рынок [35].

1.5. Тренды развития цифрового проектирования и моделирования

Настоящий раздел посвящен актуальным трендам развития рынков цифрового проектирования и моделирования. В рамках исследования, представленного в экспертно-аналитическом докладе, под рыночным трендом подразумевается изменение, задающее новое направление развития параметров рыночного явления. Тренд может быть выявлен посредством анализа изменений экономических показателей и тенденций экономического роста или спада. Основной фокус исследования сосредоточен на анализе тенденций географического и отраслевого развития мировых рынков цифрового проектирования и моделирования в 2022 году.

По итогам 2022 года регион Северной Америки занял наибольшую долю на мировом **рынке компьютерного проектирования**. Согласно оценке экспертов агентства Grand View Research, доля данного региона составила более 30% (3,5 млрд долл.). Однако эксперты отмечают, что наиболее быстро развивающимся регионом является Азиатско-Тихоокеанский, средний показатель совокупного темпа роста которого до 2030 года ожидается на уровне 8% [36]. По мнению аналитиков Market.us, доля Азиатско-Тихоокеанского региона на рынке компьютерного проектирования по итогам 2022 года составила более 28% (2,96 млрд долл.). При этом эксперты отмечают, что доля Европейского региона занимала около 23% (2,43 млрд долл.), региона Латинской Америки – 10% (1,05 млрд долл.), а доля регионов Ближнего Востока и Африки не превышала 4% (0,35 млрд долл.) [36; 37].

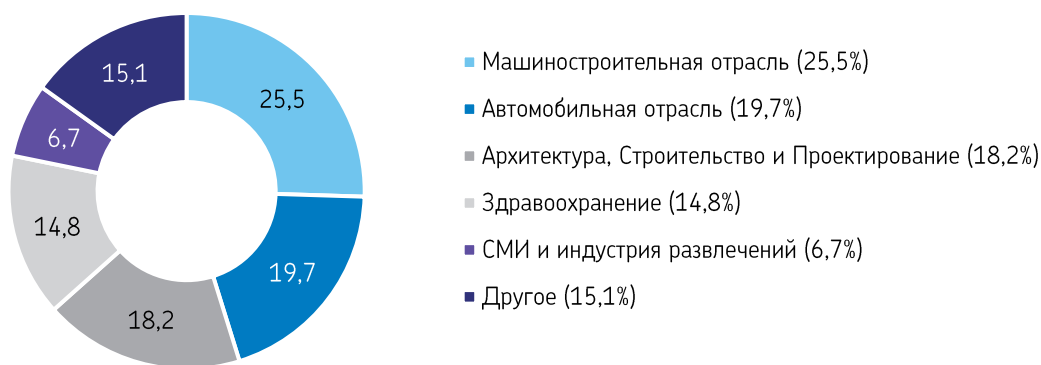
Рисунок 11. Объем региональных сегментов рынка компьютерного проектирования в 2022 году (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Grand View Research и Market.us, 2022 [36; 37]

По данным аналитической компании Grand View Research, основными потребителями рынка компьютерного проектирования в 2022 году стали машиностроительная (25,5%) и автомобильная (19,7%) отрасли, а также сфера архитектуры, строительства и проектирования (18,2%) [36].

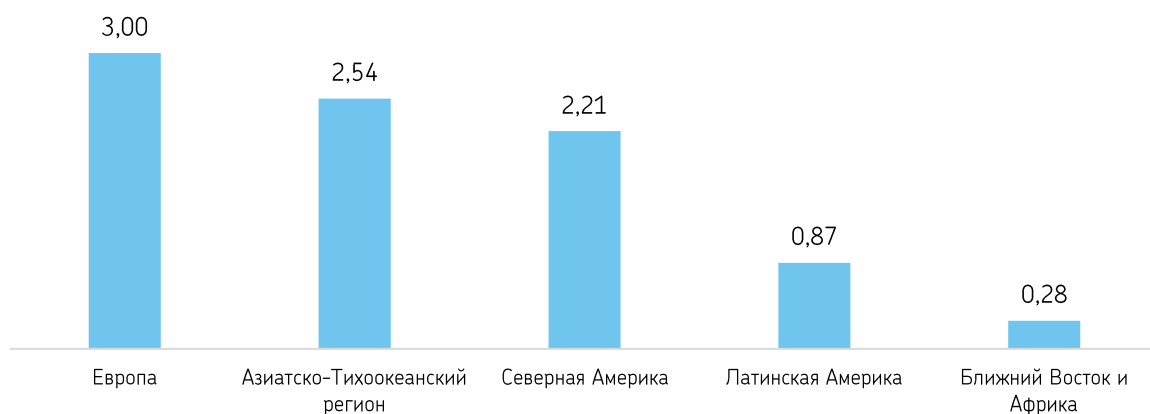
Рисунок 12. Основные потребители рынка компьютерного проектирования по отраслям в 2022 году



Источник: Grand View Research, «3D CAD Software Market Size», 2022 [36]

Наиболее успешными в области развития **рынка компьютерного инжиниринга** по результатам 2022 года стали регионы Северной Америки и Европы. По оценке аналитиков Market.us, Европа занимала долю, равную 33% данного рынка, а Северная Америка – 24,8%. Однако, по отличающимся оценкам экспертов Grand View Research, доля региона Северной Америки составляла 33%, а Европейского региона не превышала 25% [10]. По мнению аналитиков Market.us, объем Европейского региона составил 3 млрд долл., Азиатско-Тихоокеанского региона – 2,5 млрд долл., Северной Америки – 2,2 млрд долл., региона Латинской Америки – 0,87 млрд долл., регионов Ближнего Востока и Африки – 0,28 млрд долл. [38]. Наиболее быстро развивающимся регионом по итогам 2022 года является Азиатско-Тихоокеанский регион, совокупный показатель среднегодового роста которого ожидается на уровне 13% в период с 2023 по 2030 год включительно [10].

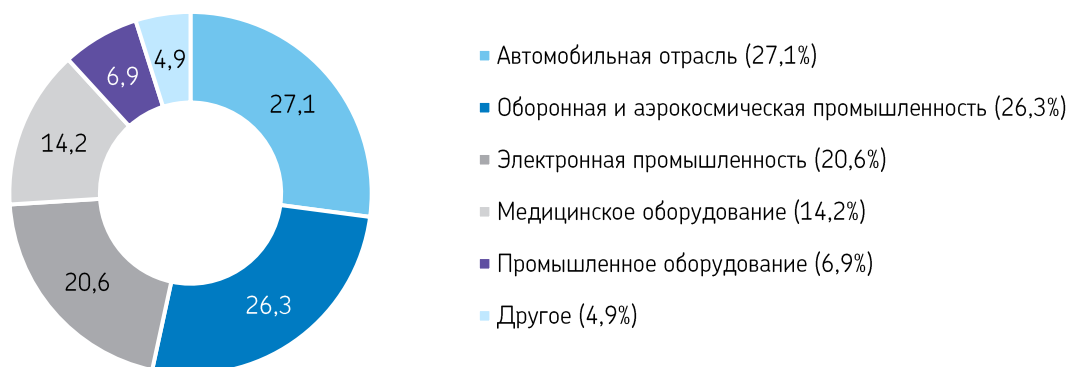
Рисунок 13. Объем региональных сегментов рынка компьютерного инжиниринга в 2022 году (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам market.us, «Computer Aided Engineering Market», 2022 [38]

Согласно данным аналитической компании Grand View Research, лидирующими потребителями рынка компьютерного инжиниринга в 2022 году стали автомобильная отрасль (27,1%), оборонная и аэрокосмическая промышленности (26,3%), суммарная доля которых составила 50%. Кроме того, значимая доля потребления (20,6%) пришлась на электронную промышленность [10].

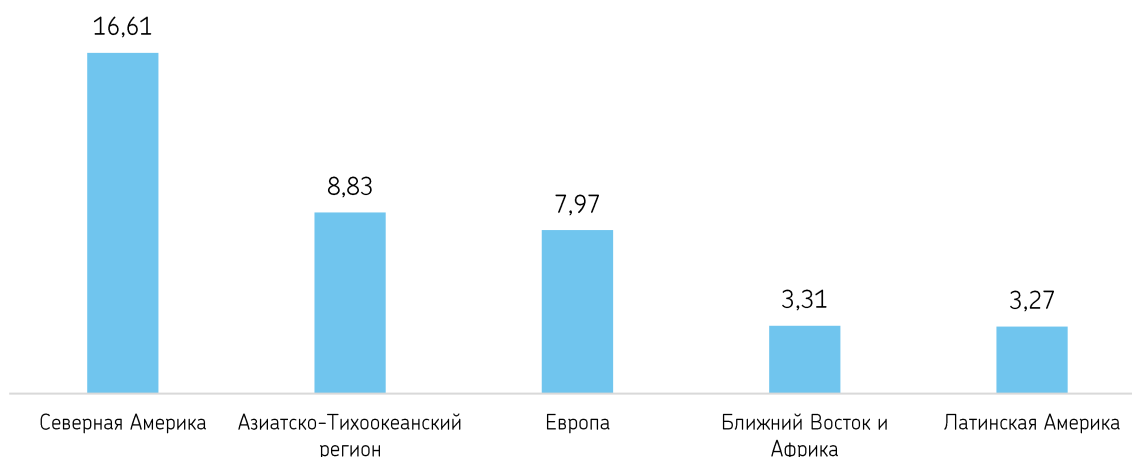
Рисунок 14. Основные потребители рынка компьютерного инжиниринга по отраслям в 2022 году



Источник: Grand View Research, «Computer Aided Engineering Market», 2022 [10]

По итогам 2022 года наибольшая доля **рынка суперкомпьютерного инжиниринга** пришлась на регион Северной Америки. Согласно мнению аналитиков Grand View Research и HPCwire, доля региона Северной Америки составила более 40% (16,6 млрд долл.), доля Азиатско-Тихоокеанского региона достигла 22% (8,8 млрд долл.), доля Европейского региона не превысила 20% (7,9 млрд долл.). Наименее развитым рынок суперкомпьютерного инжиниринга остается в регионах Латинской Америки, Ближнего Востока и Африки, общая доля которых не превысила 17% (6,7 млрд долл.) [16; 39].

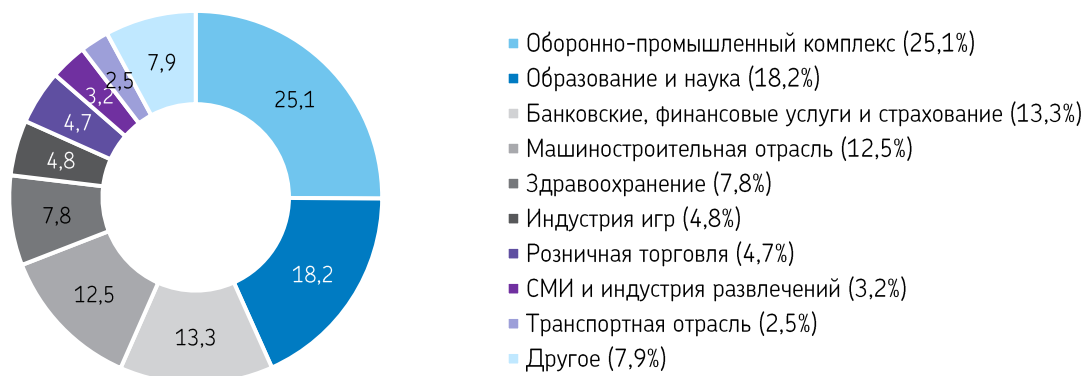
Рисунок 15. Объем региональных сегментов рынка суперкомпьютерного в 2022 году (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Grand View Research и HPCwire, 2022 [16; 39]

Ключевыми сегментами рынка суперкомпьютерного инжиниринга на конец 2022 года по оценкам Grand View Research стали оборонно-промышленный комплекс (25,1%), образование и наука (18,2%), а также банковские, финансовые услуги и страхование (13,3%) [16].

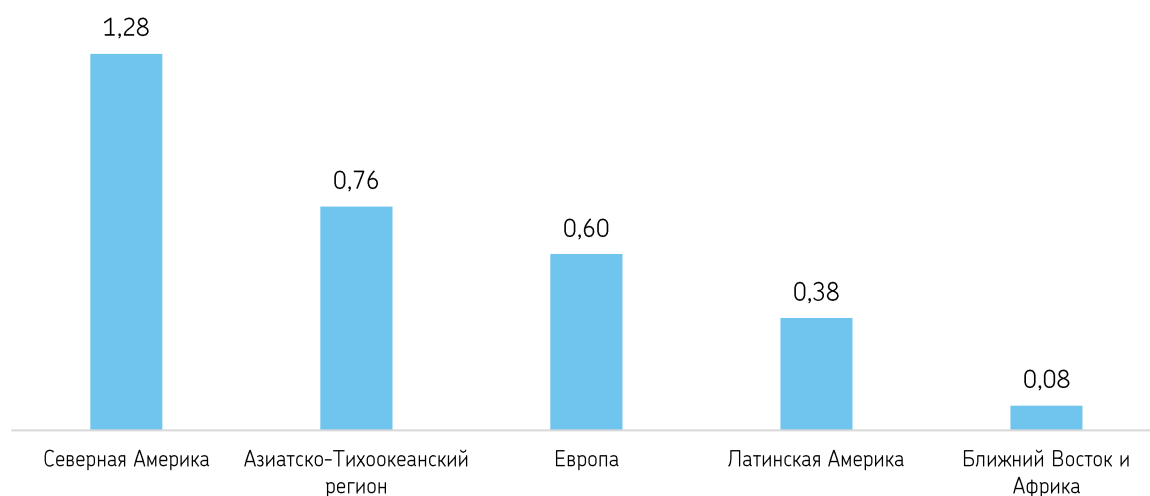
Рисунок 16. Основные потребители рынка суперкомпьютерного инжиниринга по отраслям в 2022 году



Источник: Grand View Research, «High Performance Computing Market», 2022 [16]

Наибольшая доля **рынка технологической подготовки производства** по итогам 2022 года пришлось на регион Северной Америки и Азиатско-Тихоокеанский регион. По оценкам аналитиков Skyquest, доля региона Северной Америки на конец 2022 года составляла 40% (1,2 млрд. долл.), Азиатского-Тихоокеанского региона – 24% (0,75 млрд долл.), доля Европейского региона достигла 19% (0,59 млрд долл.), доля региона Латинской Америки превысила 12% (0,38 млрд долл.), а регионов Ближнего Востока и Африки – 2,7% (0,08 млрд долл.). Согласно мнению экспертов Skyquest, до 2030 года не ожидается серьезных изменений в соотношении долей регионов на рынке технологической подготовки производства [22].

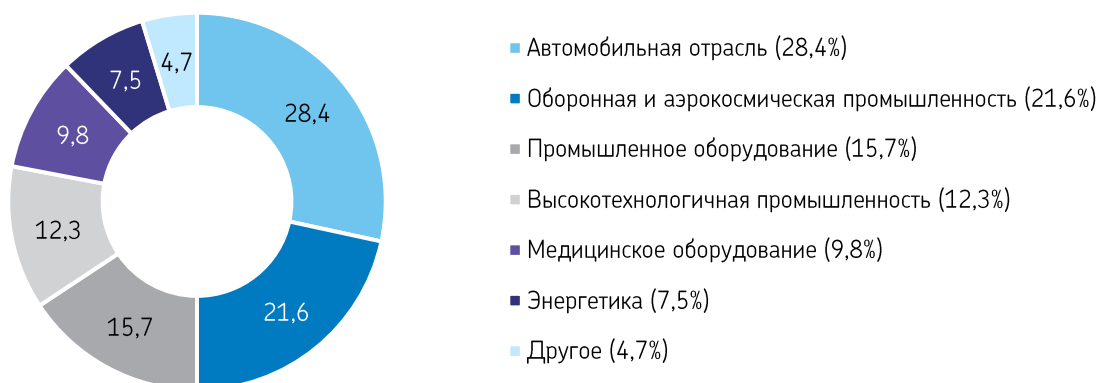
Рисунок 17. Объем региональных сегментов рынка технологической подготовки производства в 2022 году (млрд долл.)



Источник: Skyquest, «Computer Aided Manufacturing (CAM) Market», 2022 [22]

Согласно данным аналитической компании Straits Research, лидирующими потребителями рынка технологической подготовки производства в 2022 году стали автомобильная отрасль (28,4%), оборонная и аэрокосмическая промышленности (21,6%), суммарная доля которых составила 50% [40].

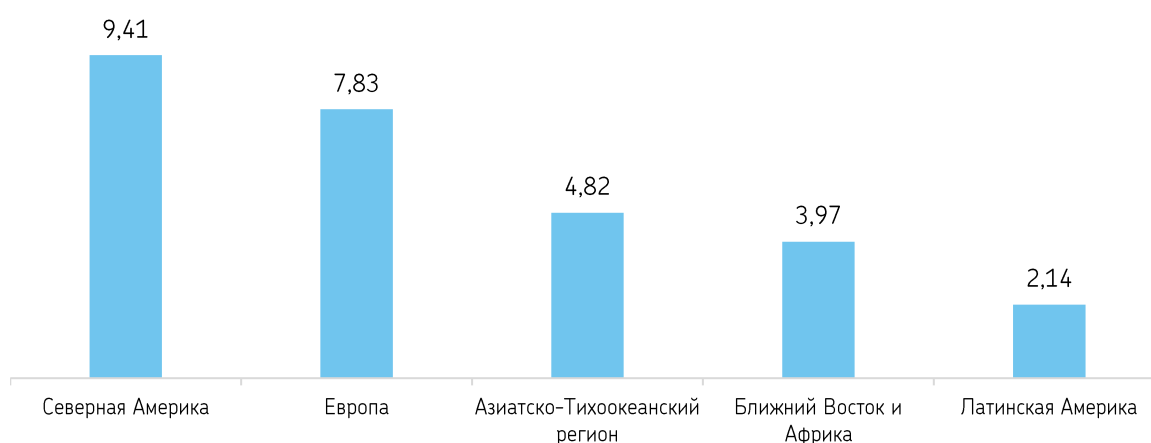
Рисунок 18. Основные потребители рынка технологической подготовки производства по отраслям в 2022 году



Источник: Straits Research, «Computer-Aided Manufacturing (CAM)», 2022 [40]

Лидерами рынка управления жизненным циклом изделий стали регионы Северной Америки и Европы. По данным компаний Research Nester и Grand View Research, по итогам 2022 года Северная Америка заняла более 33% рынка (9,4 млрд долл.), в то время как Европейский регион занял более 25% (7,8 млрд долл.). Доля Азиатско-Тихоокеанского региона достигла 17% (8 млрд долл.), в то время как доли регионов Ближнего Востока, Африки и Латинской Америки суммарно составили 20% [41; 42].

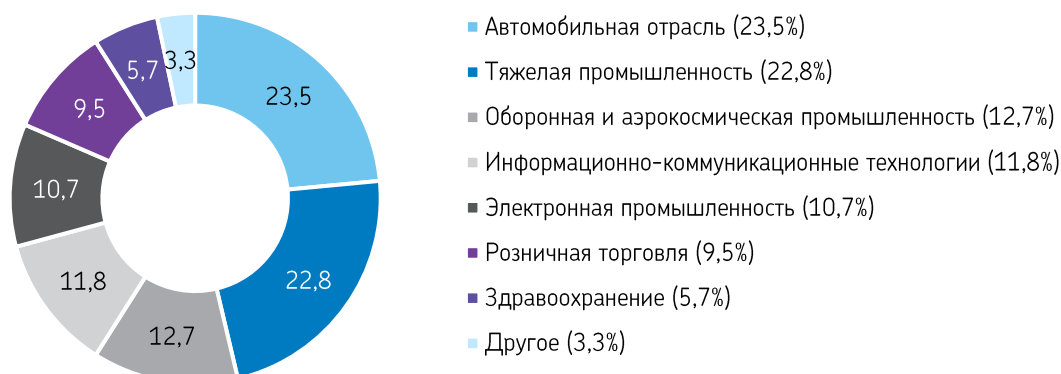
Рисунок 19. Объем региональных сегментов управления жизненным циклом изделий в 2022 году (млрд долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Research Nester и Grand View Research, 2022 [41; 42]

Наибольшая доля рынка управления жизненным циклом изделий в 2022 году пришлась на автомобильную отрасль (23,5%), тяжелую (22,8%), оборонную и аэрокосмическую (12,7%) промышленности [42].

Рисунок 20. Основные потребители рынка технологий управления жизненным циклом изделий по отраслям в 2022 году



Источник: Grand View Research, «Product Lifecycle Management Market Size, Share», 2022 [42]

Как было отмечено ранее, **рынок управления данными об изделии** является мало изученным. По результатам исследования, опубликованного аналитической компанией Transparency Market Research, в 2018 году лидирующим регионом на рынке управления данными об изделии являлась Северная Америка. В качестве наиболее быстрорастущего сегмента рынка в период с 2019 по 2030 год специалисты Transparency Market Research выделяли Азиатско-Тихоокеанский регион [43].

Согласно данным исследовательского агентства Regional Research Reports, по итогам 2022 года основными потребителями решений **рынка управления данными об изделии** являлись компании таких отраслей, как машиностроение, розничная торговля, оборонная промышленность, СМИ и индустрия развлечений, здравоохранение, энергетика, информационные технологии и телекоммуникации, банковское дело, финансовые услуги и страхование [34].

Резюме

По итогам проведенного анализа рынков цифрового проектирования и моделирования, было выявлено, что все рассмотренные рыночные направления являются достаточно зрелыми.

В 2022 году рынок суперкомпьютерного инжиниринга и рынок управления жизненным циклом изделий лидировали по объему среди других рынков. Ожидается, что наиболее быстрорастущими рынками в среднесрочной перспективе станут рынки компьютерного инжиниринга и управления данными об изделии.

Северная Америка стала регионом, лидирующим по объему в большинстве случаев, в то время как Азиатско-Тихоокеанский стал наиболее быстрорастущим регионом в 2022 году и сохранит лидирующее положение в среднесрочной перспективе. Основными потребителями решений цифрового проектирования и моделирования являются различные отрасли промышленности, такие как автомобильная, оборонная и аэрокосмическая, а также машиностроение.

ГЛАВА 2. БАРЬЕРЫ, РИСКИ И НОРМАТИВНОЕ ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РЫНКА ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ

Глава подготовлена ИЦ «Технет» СПбПУ

Глава содержит описание барьеров и рисков, встающих перед организациями, ведущими деятельность на рынках цифрового проектирования и моделирования, а также результаты анализа мер государственной поддержки научно-исследовательских работ в области цифрового проектирования и моделирования, международного и национального нормативно-технического ландшафта.

2.1. Барьеры

В разделе будут рассмотрены барьеры, риски в области цифрового проектирования и моделирования. Для выявления барьеров и оценки сферы развития компьютерного проектирования и моделирования ИЦ «Технет» СПбПУ совместно с Инфраструктурным центром «Технет» СПбПУ, а также АНО «ЦКИТ» провели опрос российских разработчиков программного обеспечения в сфере компьютерного моделирования в период с 12 мая по 18 мая 2023 года. В рамках опроса анализировалась конкурентоспособность отечественных и международных разработок, ключевые барьеры и риски развития. Результаты были представлены на конференции «Цифровая индустрия промышленной России» (31 мая – 2 июня 2023 года) [44; 45]. В рамках дальнейшего анализа представлены в том числе результаты этого опроса (далее – опрос ИЦ «Технет» СПбПУ).

По результатам проведенного опроса ИЦ «Технет» СПбПУ были выделены два типа барьеров: первый тип – барьеры развития цифрового проектирования и моделирования в России, которые необходимо преодолеть к 2024 году, второй тип – барьеры, которые необходимо преодолеть в 2024–2028 годы (в течение 5 лет).

Барьеры первого типа (до 2024 года):

1. Зависимость от иностранного обеспечения. Организации продолжают использовать иностранное программное обеспечение.
2. Недостаточность государственной поддержки закупок отечественного ПО, например, университетов, возможность закупки ПО у единого поставщика.
3. Недостаточный уровень подготовки инженерных кадров в сфере разработки ПО.
4. Прочие барьеры:
 - 4.1. Завышенная заработная плата ИКТ-специалистов.
 - 4.2. Отсутствие частных инвестиций, направляемых для развития ПО.
 - 4.3. Недостаточный спрос на российское ПО со стороны промышленных компаний.
 - 4.4. Отсутствие заинтересованности вузов в обучении кадров на базе отечественного ПО [44; 45].

Барьеры второго типа (до 2029 года):

1. Недостаточный уровень подготовки инженерного персонала на предприятиях, устаревшие практики проектирования изделий, недостаточный уровень использования CAE-технологий.
2. Несовершенство нормативного правового обеспечения: устаревшие нормы, противоречия вновь принятых и действующих стандартов.
3. Недостаточный уровень подготовки инженерных кадров в сфере разработки ПО.
4. Прочие барьеры:
 - 4.1. Нежелание предприятий формировать требования к российскому ПО, а также малая осведомленность российских потребителей о российском ПО.
 - 4.2. Малые объемы промышленного производства.
 - 4.3. Отсутствие инженерных сообществ.
 - 4.4. Недостаточный объем / нехватка мер государственной поддержки.
 - 4.5. Высокая стоимость российского ПО для предприятий [44; 45].

Организаторы опроса ИЦ «Технет» СПбПУ выделяют несколько направлений деятельности, которые впоследствии приведут к устранению или существенному «снижению» существующих барьеров:

1. Запрет на использование нелицензионного иностранного ПО на государственном уровне, в том числе запрет использования иностранного инженерного ПО: в учебном процессе ВУЗов; при выполнении НИР, финансируемых отечественными научными фондами; при выполнении подрядных работ, финансируемых из государственных средств.
2. Системная государственная поддержка российских разработчиков ПО, в том числе реальное субсидирование 50% затрат на приобретение отечественного инженерного ПО; при государственном финансировании новых разработок в сфере ИТ не менее 50% затрат должны приходиться на малые предприятия; осуществление субсидирования организаций при переходе на отечественное прикладное ПО.
3. Создание инвестиционного климата для российского ПО, в том числе снижение бюрократического и административного давления на бизнес на всех уровнях управления.
4. Интенсивное развитие нормативно-правовой базы по применению технологий цифрового проектирования и моделирования.
5. Внедрение в образовательный процесс университетов курсов по работе с российским ПО, финансирование закупок лицензий в университетах.
6. Недопущение параллельного импорта зарубежного ПО.
7. Возможность принятия результатов компьютерного моделирования (виртуальных испытаний) для выполнения оценки соответствия требованиям, предъявляемым к изделию, которая, как правило, выполняется по результатам промежуточных / приёмочных испытаний.
8. Образование инженерных сообществ.
9. Формирование российского геометрического ядра (Russian Geometric Kernel, RGK), свободно распространяемого для российских разработчиков.

10. Создание площадок (выставки, конференции) для продвижения российского ПО [44; 45].

2.2. Риски

Риски на рынке цифрового проектирования и моделирования во многом сходны с рисками цифровой трансформации промышленных предприятий. Отдельно в научной литературе, отчетах аналитических агентств, практически не выделяются риски для технологических направлений, рассматриваемых в этом экспертно-аналитическом докладе. В большей степени эти риски соответствуют направлениям передовых производственных технологий в целом. Однако можно выделить некоторые специфические риски именно для рассматриваемой сферы.

1. Технические риски:
 - 1.1. Эффективность использования программного обеспечения достигается за счет использования высокопроизводительных вычислений (HPC) для решения сложных задач. В отдельных ситуациях наличие доступа к высокопроизводительным вычислениям является условием использования инструментов компьютерного моделирования [46].
 - 1.2. Безопасность данных: риск утечки или несанкционированного доступа к этим данным может привести к серьезным последствиям, включая ущерб репутации, юридические проблемы и финансовые потери. Поэтому безопасность данных является одним из ключевых рисков в этой области.
 - 1.3. Инструменты современного компьютерного моделирования и проектирования тесно связаны с управлением жизненным циклом продукта (PLM) или системами управления базами данных (СУБД). Риск заключается в сложности интеграции этих систем, особенно если они разработаны разными производителями или имеют разные стандарты. Неправильная интеграция может привести к потере данных, неполной информации или неправильному функционированию системы. Помимо этого, существуют риски трансфера файловых данных из одного программного продукта – в другой.
2. Риски нехватки на рынке квалифицированных специалистов. Быстрое развитие технологий и постоянное обновление программного обеспечения требуют от специалистов постоянного обучения и адаптации. Так, в научных публикациях отмечается тренд постепенного изменения соотношения инженеров, специализирующихся на компьютерном проектировании и инженеров (CAD), специализирующихся в области компьютерного моделирования (CAE). Так, соотношение этих специалистов в компании Boeing изменилось с 5:1 на 1:2 соответственно. Такие изменения могут привести и к трансформации заказа на подготовку профильных специалистов вузами [47].
3. Риски, связанные с тем, что программные продукты, представленные на рынке, предоставляют пользователю различный функционал. Для решения разных задач необходимо комбинирование программных решений. Это ведет к таким рискам как проблемы совместимости, потеря функциональности.

4. Риски нехватки финансирования и экспертизы для реализации крупных программных продуктов (например, разработка собственных САЕ-систем).

2.3. Нормативное правовое регулирование, в том числе анализ государственных программ поддержки по НИРам и НИОКРам

Данный раздел посвящен обзору нормативно-правового регулирования, в том числе актуальных государственных программ поддержки научно-исследовательской деятельности в области цифрового проектирования и моделирования в разных странах. По итогам анализа можно отметить, что одним из приоритетных технологических направлений государственной поддержки в рассматриваемой области являются технологии высокопроизводительных вычислений (high performance computing, HPC). Некоторые страны уже достаточно длительное время поддерживают подобные инициативы (например, в США реализуются программы с 1980-х годов) [48], и, с каждым годом актуальность развития данных технологий растет. Это обусловлено тем, что технологии высокопроизводительных вычислений существенным образом влияют на конкурентоспособность и повышение эффективности и производительности промышленности (решение наукоемких мультидисциплинарных задач-вызовов и сокращение затрат и времени на разработку изделий, организацию процесса обработки данных, ускорение процесса принятия решений и т.д.), на развитие научно-исследовательской сферы, а также на создание передовых решений в таких активно развивающихся технологических направлениях, как цифровые двойники, искусственный интеллект, промышленный интернет, виртуальная и дополненная реальность, беспилотный транспорт и другие [49–51].

Среди стран активно инвестирующих в развитие высокопроизводительных вычислений можно выделить *США, Китай, Европейский Союз и Японию*. Именно в этих странах расположены суперкомпьютеры, входящие в ТОП-10 рейтинга (списка) наиболее мощных компьютеров мира Топ-500 [52]. Также с целью достижения лидирующих позиций в данной области и в области искусственного интеллекта активные действия со стороны государства стали предприниматься в *Великобритании*, где планируется инвестировать 900 млн фунтов (1,1 млрд долл.) в разработку эксафлопсного суперкомпьютера [51; 53]. Еще одной страной, которая стремится к лидерству в области высокопроизводительных вычислений, является *Индия*. В 2015 году в стране была запущена Национальная суперкомпьютерная миссия (the National Super Computing Mission (NSM)), благодаря которой в ведущих научно-исследовательских организациях были установлены суперкомпьютеры (часть суперкомпьютеров собственного производства) и на их основе сформирована единая сеть суперкомпьютерных мощностей [54; 55]. Кроме того, с 2022 года Индия совместно с США запустили инициативу по поддержке критически важных и развивающихся технологий (Initiative on Critical and Emerging Technology (iCET)), в рамках которой предполагается обеспечить взаимодействие органов государственной власти, академического сектора и промышленности двух стран в таких областях, как искусственный интеллект, квантовые вычисления, 5G/6G, биотехнологии, космос и полупроводники [56]. Также в рамках развития сотрудничества предполагается предпринять меры по снижению барьеров для экспорта из США в Индию суперкомпьютерных технологий [57].

В *США* на протяжении длительного времени на государственном уровне с привлечением федеральных агентств осуществляется поддержка развития технологий высокопроизводительных вычислений [58]. Приоритетность данного направления для государства сохраняется и в настоящее

время. Высокопроизводительные вычисления включены в перечень критических и развивающихся технологий (Critical and emerging technologies, CETs), которые способствуют обеспечению технологической конкурентоспособности и национальной безопасности страны [59]. Согласно актуализированному в 2022 году перечню приоритетных технологий – Critical & Emerging Technologies List Update – в области высокопроизводительных вычислений особое внимание предполагается сфокусировать на следующих субтехнологиях: суперкомпьютеры, граничные (периферийные) вычисления [60; 61], облачные вычисления, хранение данных, архитектура вычислительных систем, методы обработки и анализа данных.

Также в США принята программа исследований и разработок в области сетевых и информационных технологий (The Networking and Information Technology Research and Development, NITRD; ранее известная как High Performance Computing and Communications (HPCC) Program), являющаяся основной национальной программой, в рамках которой финансируются исследования и разработки в области высокопроизводительных вычислений, сетей и программного обеспечения [62]. В реализации программы участвует 25 федеральных агентств. В 2022 году межведомственная рабочая группа High End Computing (HEC) Interagency Working Group (IWG), действующая в рамках данной программы, опубликовала стратегический план по формированию экосистемы передовых вычислений будущего (Future Advanced Computing Ecosystem Strategic Plan FY2022 Implementation Roadmap), который содержит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы на 2022 год и последующие годы по таким стратегическим направлениям, как: формирование суперкомпьютерной экосистемы для коллективного пользования; надежная, устойчивая экосистема программного обеспечения и данных; поддержка фундаментальных, прикладных и трансляционных исследований и разработок; содействие формированию высококвалифицированных кадров в области высокопроизводительных вычислений [63].

В рамках поддержки взаимодействия промышленных компаний с национальными лабораториями Министерства энергетики США в стране запущена инициатива «Высокопроизводительные вычисления для инноваций в области энергетики» (The High Performance Computing for Energy Innovation, HPC4EI), ориентированная на реализацию краткосрочных проектов, предполагающих решение ключевых производственных проблем за счет применения суперкомпьютерных технологий. В рамках инициативы действуют две подпрограммы, одна из которых (High Performance Computing for Manufacturing Program,) направлена на совершенствование производственных процессов, решение проблемы энергопотребления продукции на протяжении всего жизненного цикла и повышение эффективности технологий преобразования и хранения энергии, а вторая (High Performance Computing for Materials Program, HPC4Mtls) – на решение ключевых проблем в разработке и модификации новых или модифицированных материалов, которые хорошо работают в тяжелых или сложных условиях [64; 65]. В 2023 году в рамках HPC4Mfg выделено 1,8 млн долл. на реализацию проектов в области производственных процессов, композиционных материалов, аддитивного производства и двигателестроения [66].

Также в рамках деятельности Министерства энергетики США действует программа по передовым научным компьютерным исследованиям (Advanced Scientific Computing Research (ASCR) program) [67], которая охватывает области суперкомпьютерных технологий, сетей, прикладной математики, численных методов и информатики. В 2023 году в рамках программы были поддержаны 6 проектов по изучению инновационных подходов к управлению и совершенствованию программной экосистемы для высокопроизводительных вычислений, включая программную экосистему,

разработанную в рамках проекта Exascale Computing Project (ECP) [68]. Общий объем финансирования на 2023 год составил 720 тыс. долл. [69].

Китай также активно инвестирует в разработку технологий высокопроизводительных вычислений. На сегодняшний день данное технологическое направление является одним из ключевых направлений, определенных в рамках принятого в 2023 году плана «Цифровой Китай» (Digital China plan) [70], направленного на содействие использованию цифровых технологий в экономической, политической, культурной, социальной и экологической областях. Ожидается, что благодаря активному развитию таких направлений, как 5G и гигабитные оптические сети, интернет вещей, центры обработки данных и суперкомпьютерные технологии к 2035 году Китай войдет в число ведущих стран мира по уровню цифровизации [71]. В развитие данного документа разработан план по созданию к 2025 году национального суперкомпьютерного интернета (supercomputing internet) и сформирован Национальный суперкомпьютерный интернет-консорциум (National Supercomputing Internet Consortium), деятельность которого направлена на создание интегрированной суперкомпьютерной сети и сервисной платформы для использования вычислительных мощностей в научно-технической, экономической и социальной сферах [72]. В процессе реализации плана предполагается решить ряд проблем таких, как несбалансированное распределение вычислительных мощностей, несовместимые интерфейсы и недостаточный уровень разработки прикладного программного обеспечения [73].

Европейский Союз также добился значительного прогресса, став одним из мировых лидеров в области суперкомпьютерных технологий. В настоящее время реализуется европейская инициатива по развитию технологий высокопроизводительных вычислений (The European High-Performance Computing Joint Undertaking, EuroHPC JU) [74; 75], объединяющая представителей 32 стран и частных организаций (European Technology Platform for High-Performance Computing, ETP4HPC; Big Data Value Association, BDVA; European Quantum Industry Consortium, QuIC) [76] с целью координации деятельности, технологических ресурсов и финансирования интегрированной европейской суперкомпьютерной инфраструктуры и данных, а также разработки экзафлопсных суперкомпьютеров с применением конкурентоспособных европейских технологий. Инициатива EuroHPC JU реализуется на основе стратегической исследовательской повестки (Strategic Research Agenda, SRA), которая формируется ассоциацией ETP4HPC [77] и включает предложения по приоритетным исследованиям и планы действий в области высокопроизводительных вычислений. Финансирование инициативы EuroHPC JU на период 2021–2027 годов составляет 7 млрд евро.

Также с 2018 года реализуется инициатива по разработке процессоров (European Processor Initiative, EPI), объединяющая организации из 10 европейских стран с целью вывести на рынок микропроцессор с низким энергопотреблением [78]. Еще одной стратегической инициативой EuroHPC JU является создание сети национальных центров компетенций в области высокопроизводительных вычислений (National Competence Centres, EUROCC) [79] в 33 странах-участницах. В рамках данной инициативы предполагается поддержка проектов по развитию необходимых навыков в области суперкомпьютерных технологий, которыми должны обладать специалисты из стран-участниц (для сокращения разрыва в уровне знаний специалистов), а также поддержка разработок в этой области и обеспечение их доступности для пользователей из научно-исследовательской сферы, промышленности, малого и среднего бизнеса и государственного управления.

Высокопроизводительные вычисления являются предметом международного сотрудничества

Европейского Союза с другими странами в рамках инициативы EuroHPC JU. Так, например, в 2022 году между ЕС и Японией было заключено соглашение о сотрудничестве по реализации цифровой трансформации (Japan-EU Digital Partnership), где высокопроизводительные вычисления определены в качестве одной из приоритетных областей развития в сферах, представляющих общий интерес для двух стран (эксафлопсные суперкомпьютеры, гибридные квантовые вычисления и др.). В рамках взаимодействия исследователям обеспечен доступ к инфраструктурам высокопроизводительных и квантовых вычислений в ЕС и Японии. Одним из механизмов реализации такого сотрудничества является поддержка проектов в рамках конкурса грантов [80; 81].

На сегодняшний момент Япония обладает одним из самых мощных суперкомпьютеров мира – Fugaku, который возглавляет международные рейтинги HPCG и Graph 500 и занимает второе место в рейтинге Top500 [82]. В стране сформирована высокопроизводительная вычислительная инфраструктура (High-Performance Computing Infrastructure, HPCI), в рамках которой в общую вычислительную среду с помощью высокоскоростных сетей объединены основные суперкомпьютеры и хранилища данных, расположенные в университетах и исследовательских институтах Японии [83]. Единая система обеспечивает доступ пользователям к вычислительным ресурсам для решения как научно-исследовательских, так и прикладных промышленных задач. Регулярно проводится конкурсный отбор проектов, для реализации которых предполагается использование суперкомпьютера Fugaku и системы HPCI [84].

В Российской Федерации создана подобная единая цифровая сеть – Национальная исследовательская компьютерная сеть России (НИКС) [85], которая обеспечивает исследователям и образовательным организациям доступ к вычислительным ресурсам для выполнения работ по приоритетным направлениям научно-технологического развития. Во исполнение поручения Президента Российской Федерации по расширению территориальной доступности и пропускной способности НИКС в 2021 [86] году между Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого, Межведомственным суперкомпьютерным центром РАН и Объединенным институтом ядерных исследований было подписано соглашение о сотрудничестве по данному вопросу [87]. По прошествии 4 месяцев были представлены результаты теста, которые подтвердили эффективность работы суперкомпьютерной инфраструктуры в объединенном формате [88]. На сегодняшний день к НИКС подключены суперкомпьютерные центры коллективного пользования сферы науки и образования общей производительностью более 100 ТФлопс, и, более 200 организаций получили доступ к вычислительным ресурсам во всех федеральных округах страны [89]. Как ожидается к 2024 году к системе будут подключены все научные и образовательные организации высшего образования [87].

Также с 2021 года в рамках деятельности межведомственной рабочей группы в области высокопроизводительных вычислений, созданной при Совете Министерства науки и высшего образования РФ по цифровому развитию и информационным технологиям, ведется работа по формированию Концепции развития суперкомпьютерной инфраструктуры Российской Федерации и актуализации прогноза развития суперкомпьютерных и грид-технологий в Российской Федерации до 2031 года [90].

Помимо государственной поддержки, направленной на развитие вычислительных мощностей, а именно аппаратной части, принимаются меры по стимулированию развития российского программного обеспечения. Работа по поддержке данного направления осуществляется на протяжении

десяти лет и перешла в активную стадию в 2022 году, что совпало с изменениями глобальной политической и экономической обстановки, в том числе с ограничениями в работе или полным уходом с российского рынка зарубежных IT-компаний. В марте 2022 года Президентом Российской Федерации был подписан указ № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (от 30.03.2022 года) [91], согласно которому с января 2025 года вводится запрет на использование иностранного программного обеспечения органами государственной власти, заказчиками на принадлежащих им значимых объектах критической информационной инфраструктуры (КИИ). Во исполнение данного указа было принято постановление Правительства Российской Федерации от 22.08.2022 № 1478, в рамках которого утверждены требования к ПО, используемому органами государственной власти, заказчиками, осуществляющими закупки по № 223-ФЗ на принадлежащих им значимых объектах КИИ, правила согласования закупок иностранного ПО, используемого на объектах КИИ, и правила перехода на преимущественное использование российского ПО на объектах КИИ [92].

В июне 2022 года Председателем Правительства Российской Федерации Михаилом Мишустиним были даны поручения по формированию индустриальных центров компетенций (ИЦК) по замещению зарубежных отраслевых цифровых продуктов и решений и центров компетенций по развитию технологических решений (ЦКР) по итогам конференции «Цифровая индустрия промышленной России» («ЦИПР-2022») [93]. В процессе создания индустриальных центров компетенций были определены 16 отраслевых комитетов по ключевым секторам промышленности и социальной сферы (машиностроение, металлургическое машиностроение, электроника и микроэлектроника, образование, транспорт и другие), которые курируют их деятельность [94]. Параллельно создавались центры компетенций по развитию технологических решений (ЦКР) в таких областях, как операционные системы, офисное программное обеспечение, облачные платформы, управление разработкой ПО, средства защиты информации и другие [95]. По состоянию на конец 2022 года в рамках развития и поддержки отечественного ПО было создано 32 ИЦК и 12 ЦКР [96].

Проекты разработанные ИЦК и ЦКР вошли в дорожные карты высокотехнологичных направлений развития «Новое индустриальное программное обеспечение» (ДК НИПО) и «Новое общесистемное программное обеспечение» (ДК НОПО) [97], утвержденные Правительственной комиссией по цифровому развитию 16 декабря 2022 года [98]. Перечень высокотехнологичных направлений и типовой паспорт «дорожной карты» были актуализированы в связи с поручением Президента России Правительству Российской Федерации перезапустить соглашения с компаниями-лидерами, крупными государственными корпорациями для формирования перспективных технологических направлений и развития «сквозных технологий». Принятые дорожные карты преимущественно сфокусированы на разработке промышленных образцов и появлении серийной продукции и в меньшей степени на исследованиях [99].

В целях реализации дорожных карт были подписаны соглашения между Правительством Российской Федерации и государственными корпорациями: по дорожной карте «Новое индустриальное программное обеспечение» соглашение было подписано с Госкорпорацией Ростех и Госкорпорацией Росатом [100], по дорожной карте «Новое общесистемное программное обеспечение» – с ПАО «Ростелеком», Фирмой «1С» и компанией «VK» [101]. Дорожные карты разработаны на период до 2027 года и содержат более 300 проектов, большая часть из которых (на общую сумму более 200 млрд руб.) будет реализована за счет собственных средств компаний. Другая часть

проектов предполагает привлечение кредитных (около 20 млрд руб.) и грантовых (более 23 млрд руб.) средств [98]. В краткосрочной перспективе ожидается, что в рамках ДК НОПО в 2023 году будут реализованы 14 проектов, а в рамках дорожной карты НИПО – 26 проектов, а также 74 проекта будут завершены в 2024 году [102].

В рамках реализации ДК НИПО предполагается создание и внедрение российского индустриального программного обеспечения на отечественные предприятия и достижение технологической независимости Российской Федерации [103]. Документ предусматривает три направления развития индустриального ПО: системы автоматизации проектирования и управления жизненным циклом изделий, системы «интернета вещей» и платформы для управления ресурсами и процессами предприятий. Доля российского ПО для автоматизации к 2030 году должна вырасти до 90% (с 41% в 2021 году), производственных платформ на базе интернета вещей – до 76,8% (с 41,5% в 2021 году), управленческих платформ – до 92,3% (с 78,5% в 2021 году). К 2030 году индекс технологической независимости в области промышленного программного обеспечения в России должен превысить 82% (в 2021 году он составлял 48%, по предварительной оценке, в 2022 году – чуть более 50%) [104].

Активное участие в разработке ДК НИПО приняли специалисты Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» и Центра Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ПИШ СПбПУ, Центр НТИ СПбПУ). Сотрудниками СПбПУ была проведена экспертно-аналитическая работа, в рамках которой были определены международные технологические тенденции развития основных классов промышленного ПО (ППО), составляющих структуру ДК НИПО, актуализирован реестр российского ППО по классам ПО, выявлены перспективные экспортные рыночные ниши российских решений ППО, разработаны предложения по актуализации системы целевых показателей ДК НИПО, проведен статистический патентный и библиометрический анализ за 2020–2022 годы в разрезе классов ПО, а также представлен перечень ключевых задач и подходов к сравнению ППО с импортными аналогами путем тестирования, верификации и валидации (на примере решений класса PLM, CAE, BIM/AEC). Выполненная экспертами СПбПУ работа позволяет выделить готовые к внедрению отечественные индустриальные конкурентоспособные разработки. Приведенные результаты экспертно-аналитического исследования будут использованы для стратегического планирования по направлению обеспечения технологической независимости РФ в области ППО [105].

Промежуточные результаты деятельности ИЦК и ЦКР в рамках дорожных карт и перспективы развития импортозамещения в России в 2023–2024 годы были представлены на ЦИПР-2023. На пленарной сессии данного форума Председатель Правительства РФ Михаил Мишустин дал ряд поручений относительно:

- запуска в 2023 году второй волны проектов разработки цифровых решений по предложениям ИЦК (на их реализацию предполагается выделение финансирования в размере 11 млрд руб.),
- формирования индустриальными центрами компетенций перечней типовых решений, относящихся к критической информационной инфраструктуре каждой отрасли и определения сроков замещения иностранных продуктов на отечественные,
- упрощения доступа разработчиков к контрактам государственных компаний

(законодательные изменения, устанавливающие статус единственного поставщика для системно значимых разработчиков, позволяющие заключать с ними контракты без проведения конкурсов),

- формирования венчурных фондов для инвестирования в отраслевые направления информационных технологий (изменения в законодательство, предусматривающие стимулирование привлечения венчурных инвестиций в российские IT-компании),
- введения и расходования на поддержку разработки отечественных IT-решений части отчислений для организаций за использование зарубежного программного продукта до перехода на отечественные решения [106; 107].

Ожидается, что данные меры будут способствовать формированию российских технологий цифрового проектирования и моделирования, не уступающих по функциональным возможностям мировым аналогам.

Резюме

По итогам анализа государственных программ поддержки технологий цифрового проектирования и моделирования можно отметить, что государства направляют существенные инвестиции на развитие технологий высокопроизводительных вычислений, преимущественно на разработку аппаратной части. При этом некоторые государства (США, Китай, Россия) также поддерживают и разработку технологий проектирования и компьютерного/суперкомпьютерного инжиниринга (программного обеспечения). Для развития этого направления в Российской Федерации приняты две дорожные карты, определяющие развитие индустриального программного обеспечения (ДК НИПО) и общесистемного программного обеспечения (ДК НОПО).

Также особое внимание государства уделяют формированию доступной суперкомпьютерной инфраструктуры для академической сферы и промышленных компаний с целью реализации научных и прикладных исследований. Организация доступа к вычислительным мощностям осуществляется в формате конкурсов перспективных проектов.

С развитием технологий искусственного интеллекта востребованность мощных вычислительных ресурсов возросла в разы. Это в свою очередь стимулировало государства (например, США, Великобританию, Японию) продолжить инвестировать в мощное аппаратное обеспечение. Например, в 2023 году Правительство Японии выделило субсидию 48,2 млн долл. на создание суперкомпьютера компании Sakura Internet, чтобы стимулировать развитие генеративного искусственного интеллекта в Японии и снизить зависимость от зарубежных предложений, таких как ChatGPT (OpenAI) [108].

Востребованность суперкомпьютерных ресурсов возрастает в том числе и в коммерческом секторе. Наиболее производительные вычислительные машины в России, которые включены в рейтинг самых мощных суперкомпьютеров мира (рейтинг ТОП-500) [52; 109], принадлежат коммерческим компаниям (например, суперкомпьютер «Червоненкис», установленный в Яндексe) и направлены на решение задач в области искусственного интеллекта.

2.4. Национальный и международный нормативно-технический ландшафт

В рамках раздела представлен обзор текущего состояния национального и международного нормативно-технического ландшафта в области цифрового проектирования и моделирования. Рассмотрены технические комитеты, регулирующие направление цифрового проектирования и моделирования, приведены некоторые технические документы, принятые в этой области.

Среди международных организаций рассмотрены организации по стандартизации США, Швейцарии, Великобритании, Германии, Франции, Бельгии. Особое внимание уделено странам, формирующим межгосударственное объединение БРИКС (Бразилия, Индия, Китай, ЮАР).

В разделе также рассмотрен подход Российской Федерации к нормативно-техническому регулированию технологий цифрового проектирования и моделирования, приведено описание деятельности технических комитетов, ответственных за реализацию программ стандартизации Российской Федерации, а также перечислены разработанные и утвержденные национальные стандарты и предварительные национальные стандарты Российской Федерации в области цифрового проектирования и моделирования.

2.4.1. Международный нормативно-технический ландшафт

В рамках раздела рассмотрены нормативно-технические документы в области цифрового проектирования и моделирования, принятые международными организациями, в том числе в рамках совместной международной деятельности. Основное внимание уделено стандартам, направленным на регулирование отношений в области систем цифрового проектирования и моделирования (CAD, CAM, CAE, PDM, PLM), при этом подробно не рассматривались нормативно-технические документы, регулирующие общие понятия программного обеспечения без привязки к технологии цифрового проектирования и моделирования.

Деятельность по стандартизации в области цифрового проектирования и моделирования проводят следующие международные организации:

- Международная электротехническая комиссия (International Electrotechnical Commission, IEC, МЭК);
- Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization, ISO, ИСО);
- Британский институт стандартов (British Standards Institution, BSI);
- Национальный институт стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST);
- Управление стандартизацией Китая (Guobiao Standards / Standardization Administration of China, GB, SAC);
- Бразильская национальная организация по стандартизации (Brazilian National Standards Organization / Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT);
- Бюро индийских стандартов (Bureau of Indian Standards, BIS);
- Южноафриканское бюро стандартов (South African Bureau of Standards, SABS) и др.

В текущем разделе рассмотрены подходы международных организаций по стандартизации: ИСО и МЭК, BSI, NIST, GB. Подходы ABNT, BIS, SABS, а также некоторых других международных организаций по стандартизации в области цифрового проектирования и моделирования приведены в Приложении 1.

ИСО (США) и МЭК (Швейцария)

Международная электротехническая комиссия (далее – ИЕС, МЭК) совместно с международной организацией по стандартизации (далее – ИСО, ИСО) проводит деятельность по разработке стандартов в области большого спектра технологий, к числу которых также относится цифровое проектирование и моделирование.

В частности, совместный международный технический комитет ISO / IEC JTC 1 «Информационные технологии» (Information technology) разрабатывает международные стандарты на информационные и коммуникационные технологии [110]. В техническом комитете отдельно сформированы подкомитеты по областям технологий, например, ISO / IEC JTC 1 / SC 7 «Разработка программного обеспечения и систем» (Software and systems engineering), ISO / IEC JTC 1 / SC 32 «Управление данными и обмен ими» (Data management and interchange) [111; 112]. ISO / IEC JTC 1 / SC 7 был создан в 1987 году и насчитывает 209 принятых стандартов и более 35 стандартов, находящихся в разработке по состоянию на начало 2023 года, в том числе совместно с другими международными организациями по стандартизации [112–114].

Среди технических документов ИСО и МЭК в области цифрового проектирования и моделирования можно выделить серию стандартов по управлению жизненным циклом программных систем и интеграции с разными видами программного обеспечения [115–133], серию стандартов по тестированию программного обеспечения [134–136], ряд стандартов по формированию требований к программным продуктам [137; 138] и др.

Отдельно стоит выделить свод знаний по разработке программного обеспечения – ISO / IEC TR 19759:2015 «Разработка программного обеспечения. Руководство к Своду Знаний по программной инженерии» (Software Engineering – Guide to the software engineering body of knowledge, SWEBOK) [139; 140]. Документ был создан в рамках сотрудничества нескольких профильных организаций: изначально он был опубликован обществом Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE), впоследствии принят в качестве стандарта совместным комитетом ИСО и МЭК.

Еще одним из направлений, в рамках которого МЭК и ИСО проводят деятельность, выступает стандартизация CASE-инструментов (Computer-aided software engineering). Понятие CASE подразумевает применение программных средств для проектирования программного обеспечения, отслеживания требований, создания кода, проведения тестирования, генерации документов и других видов деятельности по разработке программного обеспечения [141]. Так, ИСО и МЭК подготовили ряд стандартов для координации работы в области CASE-инструментов [142–145].

Также совместный технический комитет ИСО и МЭК сформировал исследовательскую группу по 3D-печати и сканированию (ISO / IEC JTC 1 / SG 3) для разработки стандартов в области цифрового проектирования и моделирования для применения в аддитивном производстве [110].

Большинство разрабатываемых и принятых стандартов в рамках деятельности совместного комитета ИСО и МЭК являются общесистемными для любого вида программного обеспечения и практически не привязаны к определенной технологии цифрового проектирования и моделирования или к определенной области применения [146–149].

В перечне стандартов ИСО в области CAD-технологии⁴ приводится 5 стандартов, среди которых ISO 3098–5:1997, ISO 11442:2006, ISO 13567–1:2017, ISO 13567–2:2017 и ISO 16792:2021 [150]. Разработка перечисленных стандартов проведена техническим подкомитетом ISO / TC 10 / SC 1 «Базовые обозначения» (Basic conventions), регулирующим область разработки технической документации на изделие, и техническим подкомитетом ISO / TC 10 / SC 8 «Документация на конструкции» (Construction documentation), регулирующим область разработки технической документации на строительные объекты, при этом оба подкомитета относятся к деятельности технического комитета ISO / TC 10 «Техническая документация на продукцию» (Technical product documentation).

Также можно привести стандарты ИСО в области интеграции данных, в том числе в системах PLM, например, серию стандартов о представлении данных о продукте и их обмене [151], серию стандартов по управлению данными промышленного производства [152], серию стандартов по интеграции возможностей управления технологическим процессом и оптимизации производственных систем [153], а также ISO / TR 3151–1, ISO / CD TS 15926–4, ISO / DIS 10303–1 и другие стандарты, находящиеся в разработке [154–157]. Приведенные стандарты направлены в первую очередь на определение принципов и подходов к интеграции промышленных систем и управления данными производства, однако могут служить основой для формирования принципов функционирования программных систем цифрового проектирования и моделирования.

В разрезе отраслей применения можно привести серию стандартов по представлению и обмену данными 3D-моделей [158; 159], стандарты по обмену данными в области оптики и фотоники [160], стандарты в области аддитивных технологий [161], а также стандарты по цифровым двойникам производства [162–164]. Не менее значимым является стандарт DS / ISO / IEC 26550 «Программная и системная инженерия – Эталонная модель для разработки и управления продуктовой линейкой» (Software and systems engineering – Reference model for product line engineering and management), который определяется разработчиками стандарта в качестве отправной точки для всего набора международных стандартов по управлению продуктовой линейкой программных продуктов [165].

BSI (Великобритания)

Среди нормативно-технических документов Британского института стандартов (далее – BSI) можно выделить серию стандартов для аэрокосмической отрасли по архивированию и хранению цифровой технической документации – данных 3D-моделей, CAD- и PDM-систем [166–168]. Эти

⁴ В соответствии с международной системой классификации технических стандартов (International Classification for Standards, ICS).

же документы приводят Немецкий институт по стандартизации (далее – DIN) и Европейский комитет по стандартизации (далее – CEN) [169].

BSI также ссылается на серию стандартов ИСО в области промышленных автоматизированных систем и их интеграции [170], в частности, ISO / TS 10303–1231:2008, ISO / TS 10303–1628:2008, ISO / TS 10303–1760:2008, а также на серии стандартов по технической документации на изделие [171], системной и программной инженерии и др.

NIST (США)

Национальный институт стандартов и технологий США (далее – NIST) на протяжении долгого времени проводит регуляторную деятельность в области технологий цифрового проектирования и моделирования.

Одними из первых документов по стандартизации в области CAM-технологий можно считать технический отчет NBSIR 76–1094 «Standards for Computer Aided Manufacturing», опубликованный в 1976 году, и технический отчет AFML–TR–77–145 «Standards for Computer Aided Manufacturing», опубликованный в 1977 году [172–174], в которых рассмотрены особенности применения CAM-систем. Оба документа подготовлены Национальным бюро стандартов США (U.S. Bureau of Standards), которое затем было переименовано в Национальный институт стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, NIST). Так, в приведенных документах определены и оценены существующие и потенциальные стандарты, которые будут полезны вооруженным силам США при разработке и внедрении интегрированных систем автоматизированного производства (Integrated computer-aided manufacturing, ICAM). Также в 1983 году NIST опубликовал отчет, в котором рассмотрены общие требования к интерфейсу систем проектирования (The Standards Interface for Computer-Aided Design) [175].

В 1993 году NIST совместно с федеральными структурами США опубликовал IDEFO (Integration definition for function modeling) – технический документ, направленный на формирование единого подхода и методологии к моделированию сложных объектов и систем [176]. Методология разрабатывалась в рамках программы ICAM, принятой США в 1970-е годы. Серия IDEF включает 14 стандартов и применяется во многих отраслях и государствах, в том числе в Российской Федерации. NIST продолжает поддерживать инициативу IDEF, некоторые эксперты NIST применяют IDEF в своих исследованиях [177–182].

В 2001 году NIST опубликовал рекомендации по обеспечению безопасности информационных технологий, которые должны соблюдаться на всех стадиях жизненного цикла систем, начиная с разработки [183]. В 2006 году были опубликованы технические документы, в которых рассмотрена роль стандартов в поддержании информационных систем управления жизненным циклом продуктов и систем (Product lifecycle management, PLM) [184–186].

NIST продолжает проводить исследования, направленные на обеспечение безопасности разрабатываемого программного обеспечения, совершенствование методов моделирования в различных областях применения, разработку архитектуры программных продуктов для проектирования сложных систем и др. [187–190] Таким образом, NIST проводит масштабную нормативно-техническую

работу в области технологий цифрового проектирования и моделирования, результаты которой применяются многими разработчиками ПО.

GB (Китай)

Управление стандартизацией Китая (GB, SAC) проводит активную деятельность в направлении нормативно-технического регулирования технологий цифрового проектирования и моделирования. В 2018 году был представлен стандарт, определяющий основные типы классов компьютерного программного обеспечения, среди которых приведены CAD, CAM, PLM и PDM-системы [191]. Однако нормативно-техническое регулирование технологий цифрового проектирования и моделирования в Китае началось раньше.

Так, в 1993 году был опубликован стандарт DL 5026–1993, направленный на техническое регулирование применения CAD-систем в энергетической промышленности [192], в 1995 году был представлен стандарт GB / T 15751–1995, в котором определены основные термины и требования к технической документации при применении CAD-систем [193].

В 2008 году был опубликован стандарт в области обмена данными при применении CAD и CAM-систем [194], в 2011 и 2016 году годах – стандарты по управлению жизненным циклом продукта [195; 196], в 2017 году – нормативно-технический документ, направленный на управление данными жизненного цикла продукта [197]. Помимо этого, GB публиковало нормативно-технические документы по применению предприятиями PDM-продуктов [198; 199].

Важно отметить, что в 2014 году GB опубликовало стандарт GB / T 31054–2014 на проведение конечно-элементного моделирования при применении CAE-систем для механических устройств [200], а в 2018 году – стандарт по представлению данных моделирования [201]. В 2021 году также был опубликован ряд стандартов по применению PDM-систем.

2.4.2. Национальный нормативно-технический ландшафт

Реализация национальных проектов в области стандартизации осуществляется по приоритетным направлениям, среди которых на 2023 год отмечены информационные, цифровые технологии и телекоммуникации [202]. В Российской Федерации ведется активная работа по формированию национального нормативно-технического ландшафта в области цифрового проектирования и моделирования, при этом накоплен значительный нормативно-технический задел [203].

Среди общесистемных национальных стандартов, направленных на применение технологий цифрового проектирования и моделирования, можно выделить серию стандартов «Единая система программной документации»; серию стандартов «Единая система конструкторской документации», в том числе электронной; серию стандартов «Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы»; а также заимствованные ГОСТ серии «Системы автоматизации производства и их интеграция», «Системы промышленной автоматизации и интеграция», предварительные национальные стандарты серии «Умное производство» и др. Основные национальные стандарты и предварительные национальные стандарты в области технологий цифрового проектирования и моделирования приведены в Приложении 2. Также в Приложении 4 приведен перечень национальных стандартов, планируемых к разработке в области численного

моделирования в соответствии с Перспективным планом стандартизации в области передовых производственных технологий на 2018–2025 годы.

Серия стандартов в области единой системы программной документации (далее – ЕСПД) была подготовлена преимущественно в 1980–1990-е годы, вследствие чего часть стандартов может являться морально устаревшей. Стандарты серии ЕСПД содержат формальные требования к составу, содержанию и оформлению документов, описывающих программные продукты на разных стадиях жизненного цикла [204]. Аналогично серия стандартов «Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы» была подготовлена в 1980–1990-е годы, при этом ведется работа по обновлению стандартов, входящих в серию. Комплекс стандартов готовился в качестве взаимоувязанной системы стандартов по осуществлению взаимодействий между разработчиками и пользователями программного обеспечения.

Помимо этого, в Российской Федерации проводится значительная работа по развитию цифровых и информационных технологий, в рамках которой конкретные направления деятельности курируются отдельными техническими комитетами, к числу которых относятся ТК700, ТК022 [205], ТК482, ТК459, ТК165 и др. Некоторые перечисленных будут рассмотрены ниже.

Так, в России действует технический комитет по стандартизации ТК700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии», созданный в 2014 году [206]. Ведение деятельности комитета ТК700 осуществляет Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (далее – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») под руководством председателя ТК700, заместителя Министра промышленности и торговли Российской Федерации Рязанцева О. Н. В рамках деятельности ТК700 проводится подготовка и принятие национальных стандартов, направленных на регулирование возможностей применения численного моделирования и проведения высокопроизводительных вычислений в различных отраслях промышленности.

В частности, в рамках деятельности комитета ТК700 были подготовлены стандарты для моделирования физических процессов, моделирования течений жидкостей и газов, ударных взаимодействий, разработки высокотехнологичных промышленных изделий, моделирования динамических процессов социотехнических систем и др. [207; 208] Особое внимание уделено процедурам верификации и валидации программного обеспечения, позволяющего проводить численное моделирование, а также требованиям к разработке высокопроизводительных вычислительных систем.

Также в рамках деятельности ТК700 в соответствии с Программой национальной стандартизации на 2020 год и Программой национальной стандартизации на 2021 год специалистами Центра НТИ СПбПУ совместно с сотрудниками ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» был разработан стандарт ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [209]. ГОСТ Р 57700.37–2021 был утвержден 16 сентября 2021 года приказом №979ст. руководителя Росстандарта А. П. Шалаева. Стандарт введен в действие на территории Российской Федерации с 1 января 2022 года.

Для разработки национального стандарта была создана рабочая группа «Цифровые двойники», которую возглавил проректор по цифровой трансформации СПбПУ, руководитель Научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии», Центра компетенций НТИ «Новые

производственные технологии» и Инжинирингового центра CompMechLab® СПбПУ Алексей Боровков. Работы по подготовке стандарта также велись при активном участии полномочных представителей 25 отечественных высокотехнологичных предприятий и отраслевых институтов.

Важным событием в развитии нормативно-технического регулирования в области цифровых двойников стало 13-ое заседание специальной рабочей группы по стандартизации Российско-Китайской Подкомиссии по сотрудничеству в области гражданской авиации и гражданского авиастроения, которое прошло 17 апреля 2023 года. В рамках заседания было принято решение о включении 6 национальных стандартов Российской Федерации в перечень взаимно признаваемых, при этом все стандарты относятся к области компьютерного моделирования, верификации и валидации компьютерных моделей, электронного макета и цифровых двойников изделий [210].

Помимо этого, в Российской Федерации приняты стандарты по проектированию отдельных видов изделий, например, в области электроники, информационного моделирования строительных объектов и др. [211] Особое внимание следует обратить на серию стандартов в области систем автоматизированного проектирования электроники.

Так, в 2020 году был создан технический комитет ТК165 «Системы автоматизированного проектирования электроники» на базе ООО «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА» [212]. Как отмечают представители ТК165, созданию комитета предшествовала разработка и широкое обсуждение дорожной карты развития систем автоматизированного проектирования электроники, направленной на формирование полноценной системы проектирования электронных изделий, которая является первой в мире в своей области [213]. Основные положения разработанной дорожной карты легли в основу программы созданного технического комитета. По результатам деятельности ТК165 в 2021–2023 годах было опубликовано более 20 стандартов [214].

В частности, в 2022 году был принят стандарт ГОСТ Р 70201–2022 «Системы автоматизированного проектирования электроники. Оптимальное сочетание натурных и виртуальных испытаний электроники на надежность и внешние воздействующие факторы. Требования и порядок проведения при выполнении технического задания на НИОКР» [215]. В рамках стандарта определяются особенности применения цифровых двойников электроники на ранних этапах проектирования, изготовления и испытаний электронной аппаратуры и электронной компонентной базы. Также стандарт устанавливает требования к натурным и виртуальным испытаниям и порядок их проведения при выполнении технического задания на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (далее – НИОКР).

Опубликованный стандарт ГОСТ Р 70201–2022 является одним из первых стандартов, направленных на формирование подхода к совместному проведению натурных и виртуальных испытаний при разработке изделий. При этом в стандарте приведены примеры программного обеспечения, которое возможно использовать для проведения компьютерного моделирования и виртуальных испытаний при разработке изделий. Помимо стандарта серии «Системы автоматизированного проектирования электроники», ряд документов по направлению «Роботы и робототехнические устройства» также приводит положения, касающиеся применения математического моделирования и проведения виртуальных испытаний на разные виды воздействий, например, ГОСТ Р 60.0.7.2–2020, ГОСТ Р 60.0.7.3–2020, ГОСТ Р 60.0.7.4–2020, ГОСТ Р 60.0.7.5–2020.

Деятельность ТК165 может служить примером системной работы в области развития технологий цифрового проектирования и моделирования для применения в отдельных отраслях промышленности.

Также стоит отметить деятельность технического комитета ТК482 «Поддержка жизненного цикла продукции», сформированного 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 [216]. Среди опубликованных стандартов, относящихся к деятельности комитета ТК482, можно отметить стандарты по электронной конструкторской документации, в том числе по представлению трехмерных моделей, управлению данными и требованиями и др. [217; 218] В рамках управления жизненным циклом ведет деятельность технический комитет ТК459 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий» [219; 220].

Стоит отметить, что в Российской Федерации разрабатываются и применяются национальные нормативно-правовые документы, направленные на формирование единой среды в области цифрового проектирования и моделирования. Так, в 2020 году была подготовлена предварительная версия концепции национальной суперкомпьютерной инфраструктуры, обновление которой было запланировано на 2021 год [221]. Для решения этой задачи при Совете Министерства науки и высшего образования РФ по цифровому развитию и информационным технологиям была сформирована межведомственная рабочая группа в области высокопроизводительных вычислений, в которую вошли представители национальных суперкомпьютерных центров, научных организаций и Национальной исследовательской компьютерной сети (далее – НИКС) [90]. Обновление концепции и реализация поставленных задач по развитию суперкомпьютерной инфраструктуры России приостановлены на некоторое время.

Отдельно в качестве примера можно привести деятельность Центра тестирования, верификации и валидации инжинирингового программного обеспечения, созданного в 2019 году на базе СПбПУ. В рамках деятельности Центра разрабатываются регламенты и руководства по проведению тестирования, верификации и валидации инженерного программного обеспечения.

Как было отмечено в разделе 2.1, Центром НТИ СПбПУ и Инфраструктурным центром НТИ по направлению «Технет» СПбПУ был проведен опрос среди отечественных разработчиков программного обеспечения [44; 222]. Так, разработчики отметили наиболее значимые нормативно-технические документы для применения в области цифрового проектирования и моделирования, среди которых были упомянуты документы серии Единой системы конструкторской документации, Единой системы программной документации, стандарты по численному моделированию, системам автоматизированного проектирования электроники и некоторые международные стандарты. Также несколько разработчиков отметили значимость применения Agile-подхода к разработке программного обеспечения. Подробнее результаты опроса в части нормативно-технического регулирования, а также краткий обзор Agile-подхода приведены в Приложении 3.

Таким образом, в Российской Федерации ведется деятельность по разработке и поддержанию в актуальном состоянии стандартов в области цифрового проектирования и моделирования. Деятельность в области стандартизации технологий цифрового проектирования и моделирования определяется работой технических комитетов, например, ТК700, ТК022, ТК482, ТК459, ТК165.

Так, в рамках деятельности комитета ТК700 был подготовлен ряд стандартов по проведению моделирования физических процессов, разработки высокотехнологичных промышленных изделий и др., а также стандарт, определяющий термины и общие положения по разработке и применению цифровых двойников изделий. В рамках деятельности комитета ТК165, в свою очередь, был опубликован один из первых стандартов, определяющих возможности проведения натурных и виртуальных испытаний при разработке продукции, что может служить основой для дальнейшей работы в данном направлении.

Кроме того, можно выделить более 100 стандартов в области разработки программного обеспечения, в том числе инженерного, однако часть стандартов может нуждаться в актуализации. В связи с этим необходимо определить потребность в пересмотре планов по стандартизации в области программного обеспечения и организации масштабной деятельности по обновлению национальных стандартов, устранению большой доли заимствованных стандартов, а также устранению противоречащих друг другу нормативно-технических документов.

Резюме

Большинство европейских и американских организаций по стандартизации проводят совместную работу в области нормативно-технического регулирования технологий цифрового проектирования и моделирования, как правило, по общесистемным характеристикам программных продуктов, из чего следует, что международный нормативно-технический ландшафт в области программного обеспечения находится на достаточно зрелом уровне, однако нормативно-технические документы в области инженерного программного обеспечения мало представлены. Отдельную работу по направлениям конкретных технологий цифрового проектирования и моделирования международные организации практически не проводят. Учитывая зрелость современных программных продуктов, которые начали развиваться в 1960-е годы, можно предположить, что существующего количества стандартов в области разработки программного обеспечения достаточно для разработки инженерного программного обеспечения в рамках технологий цифрового проектирования и моделирования.

Отдельное направление, которое рассматривается международными европейскими и американскими организациями в области цифрового проектирования и моделирования, включает подготовку технической документации на продукцию на основе данных CAD-систем и 3D-моделей, а также большое внимание уделяется вопросам безопасности применения программного обеспечения, интеграции данных между различными системами, управлению требованиями и пр.

Если рассмотреть подходы к стандартизации в области цифрового проектирования и моделирования в странах БРИКС, то можно сделать вывод, что в Китае достаточно развито самостоятельное нормативно-техническое регулирование технологий цифрового проектирования и моделирования. В то же время в Бразилии, Индии и ЮАР стандартизация в области цифрового проектирования и моделирования находится на начальном уровне и преимущественно направлена на заимствование международных стандартов (обзор деятельности ABNT, BIS, SABS и некоторых других международных организаций по стандартизации приведен в Приложении 1).

В отличие от международного нормативно-технического ландшафта, в отечественной системе стандартизации практически отсутствуют нормативно-технические документы, регулирующие основы безопасности, рисков, интеграции данных между системами и проч. Это может

свидетельствовать о низкой востребованности технических документов подобного рода, при этом в ряде зарубежных стран отмечается важность работы в области формирования безопасности при интеграции систем и обмене данными, которая должна быть обеспечена на всех стадиях жизненного цикла программного продукта.

В свою очередь, в Российской Федерации ведется планомерная работа по подготовке стандартов в области численного моделирования для применения в разных отраслях промышленности, а также разработка стандартов, направленных на регулирование проведения натурных испытаний продукции совместно с виртуальными испытаниями. Деятельность Российской Федерации, направленная на формирование национального нормативно-технического ландшафта в области цифрового проектирования и моделирования, носит системный характер и является одним из приоритетных направлений деятельности технических комитетов Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Таким образом, национальный нормативно-технический ландшафт представляет собой более практико-ориентированную и прикладную структуру в области применения 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.

При этом, как было рассмотрено ранее, ведется масштабная деятельность в области разработки нового индустриального программного обеспечения, что соответствует государственной повестке в направлении импортозамещения, формирования технологического суверенитета и обеспечения национальной безопасности, в связи с чем повышается потребность в обновлении национальной системы стандартов в области цифрового проектирования и моделирования для применения в различных отраслях промышленности, а также возникает необходимость перехода на следующий уровень стандартов, направленных на формирование и обеспечение безопасности при эксплуатации востребованного инженерного программного обеспечения.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ИГРОКИ И ПРОЕКТЫ НА РЫНКЕ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ТЕХНЕТ» НТИ

Глава подготовлена ИЦ «Технет» СПбПУ

Данная глава посвящена обзору деятельности организаций, являющихся основными игроками рынков цифрового проектирования и моделирования и оказывающих непосредственное влияние на особенности развития данных рынков. Глава содержит подробное описание деятельности организаций–лидеров, особое внимание уделяется анализу бизнес-моделей и финансовых стратегий данных организаций. Важную часть исследования составляет анализ проектов в области цифрового проектирования и моделирования, реализуемых организациями–лидерами.

3.1. Основные игроки: количество, рыночные доли, описание продуктов и разработок

Настоящий раздел посвящен описанию лидирующих компаний на рынках цифрового проектирования и моделирования. В рамках исследования, представленного в экспертно-аналитическом докладе, под основными игроками рынка подразумеваются организации, демонстрирующие высокие результаты экономической деятельности и определяющие траекторию развития соответствующего технологического направления.

В рамках анализа рынков цифрового проектирования и моделирования был выделен ряд компаний–лидеров в области разработки различных классов программных систем (CAD, CAM, CAE, PDM, PLM), применяемых в промышленности. Критериями для формирования перечня лидеров стали:

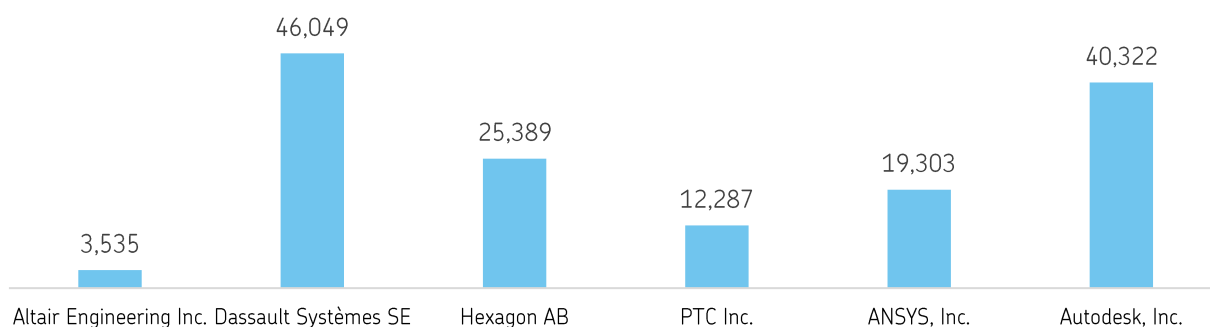
- размещение компанией своих ценных бумаг на бирже NASDAQ⁵, что предполагает прохождение процедуры листинга и удовлетворения многих требований, в частности, по публичному представлению информации о себе [223]. Соответствовать подобным требованиям могут преимущественно компании, занимающие устойчивые позиции на мировом рынке;
- востребованность программных систем, разрабатываемых компанией во многих отраслях промышленности, что позволяет пользователям решать инженерные задачи различного класса. В перечень не включены компании, чьи программные системы решают задачи специфичные для ограниченного числа отраслей.

С учетом данных отчета банка Drake Star «Передовые производственные технологии. 3 квартал 2022 года. Новости отрасли» (Advanced manufacturing technology. Q3 2022. Industry update), направление «Промышленное программное обеспечение» (Industrial Software), среди основных игроков рынка цифрового проектирования и моделирования были выделены: Altair Engineering Inc., ANSYS, Inc., Autodesk, Inc., Dassault Systèmes SE, Hexagon AB, PTC Inc. Для сравнения

⁵ Американская биржа NASDAQ – фондовая биржа, специализирующаяся на акциях компаний, работающих в технологическом секторе.

позиций компаний на рынке выделены показатели рыночной капитализации по состоянию на III квартал 2022 года.

Рисунок 21. Рыночная капитализация / МСАР компаний-лидеров в области цифрового проектирования и моделирования (млн долл.)



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Drake Star, «Advanced manufacturing technology. Q3 2022. Industry update», 2022 [224]

Также в перечень компаний-лидеров была включена компания Siemens Digital Industries Software (США) [225]. Данная компания является разработчиком программного обеспечения в области цифрового проектирования и моделирования, управления жизненным циклом продукции и производственными операциями. Большое количество промышленных организаций используют решения, разрабатываемые компанией. Так, согласно данным открытых источников, PLM-систему Siemens Teamcenter используют 7 479 клиентов [226], а CAD/CAE/CAM-систему Siemens NX – 6 582 компаний [227].

Основные игроки рынка цифрового проектирования и моделирования:

- *Altair Engineering Inc.* – компания разрабатывает программное обеспечение и облачные решения в сфере проектирования и моделирования, высокопроизводительных вычислений (HPC), анализа данных и искусственного интеллекта (AI). Среди наиболее востребованных программных продуктов компании можно выделить следующие [228]: Altair Hyperview, Altair HyperMesh, Altair OptiStruct, Altair Radioss и другие [229]. Также компания активно внедряет на рынок более доступные для широкого круга пользователей решения Altair Inspire [230]. В 2022 году Altair анонсировал комплексное решение по созданию и применению цифровых двойников на протяжении всего жизненного цикла изделия [231]. В апреле 2023 года было выведено на рынок облачное программное решение для расчета прочности конструкций Altair SimSolid Cloud, которое выполняет структурный анализ полнофункциональных CAD-сборок за считанные минуты, без создания конечно-элементной сетки [232; 233]. В компании работает более 2 800 штатных сотрудников и более 250 сотрудников инженерно-технических служб в представительствах по всему миру (по состоянию на 2021 год) [234].
- *ANSYS, Inc.* – компания специализируется на разработке программных систем для инженерного анализа и численного моделирования [235]. Наиболее популярными программными системами среди промышленности являются: Ansys LS-DYNA, Ansys

Mechanical, Ansys HFSS, Ansys Fluent, Ansys Fluids. Тем не менее у компании существует широкий спектр и других решений [236], одним из которых является Ansys Twin Builder. Данное решение постепенно становится востребованным среди промышленных компаний благодаря функциональным возможностям, обеспечивающим создание цифровых двойников и управление жизненным циклом изделий и объектов [237]. В разработке и усовершенствовании программных систем принимает участие 2 100 разработчиков, всего в компании работает 5 600 сотрудников (по состоянию на 2022 год) [235].

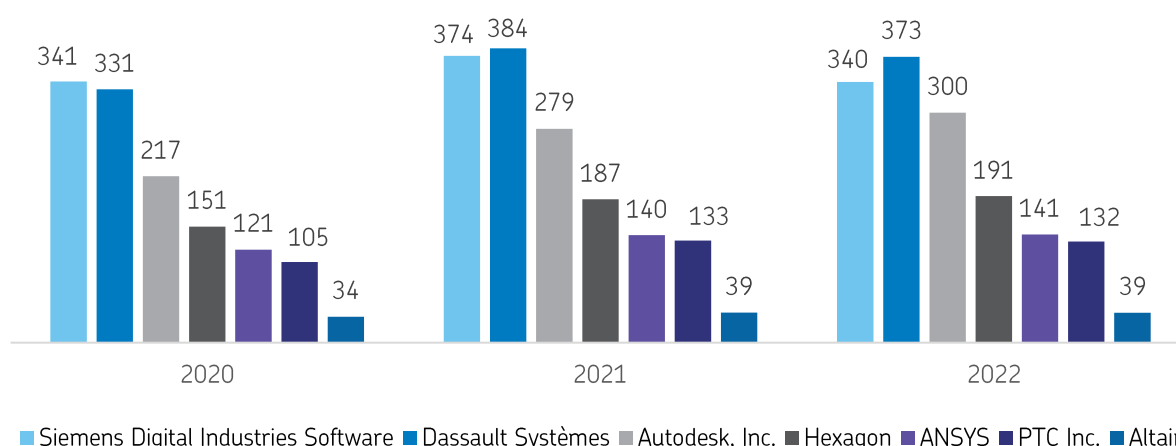
- *Autodesk, Inc.* – крупнейшая в мире компания, которая разрабатывает системы автоматизированного 2D и 3D проектирования и услуг для рынков машиностроения, промышленного и гражданского строительства, цифровых медиа и индустрии развлечений [238]. Среди наиболее востребованных в промышленности решений компании можно выделить: Autodesk AutoCAD, Inventor, Fusion 360, AutoCAD Civil 3D [229, с. 5; 239]. Совокупно в компании работает 11 500 человек (по состоянию на 2021 год) [240].
- *Dassault Systèmes SE* – компания-разработчик программного обеспечения для проектирования, создания цифровых макетов и управления жизненным циклом продукта [241]. Среди 13 программных решений [242], представленных данной компанией на рынке цифрового проектирования и моделирования, есть программная система CATIA, обладающая широкими возможностями в области проектирования и высокой производительностью. Данная система является одной из трех систем в мире (Siemens NX, PTC Creo), предназначенных для разработки сложных комплексных изделий, состоящих из множества сборочных узлов, включающих в себя десятки тысяч деталей (применяется преимущественно компаниями автомобилестроения, кораблестроения и в авиакосмической отрасли) [243]. Данное решение, как и другие базируются на цифровой платформе 3D EXPERIENCE [244]. В компании работает 22 523 сотрудника, из них 9 192 сотрудника в сфере НИОКР (по состоянию на 2022 год) [241].
- *Hexagon AB* – международная группа компаний, осуществляющая деятельность в области разработки и внедрения технологий и решений цифровой реальности [245]. В 2017 году группой компаний была приобретена компания MSC Software, разрабатывающая решения в области компьютерного инжиниринга изделий и производственных процессов [246]. Среди решений Hexagon/MSC Software [247] представлено одно из наиболее распространенных в мире ПО для проведения расчетов методом конечных элементов (МКЭ) – MSC Nastran, которое входит в портфель продуктов Multiphysics [248] для создания цифровых двойников на основе мультидисциплинарного моделирования. В компании насчитывается 24 000 сотрудников, 5 000 сотрудников осуществляют научно-исследовательскую деятельность (согласно отчету 2022 год) [249].
- *PTC Inc.* – компания-разработчик программного обеспечения для автоматизированного проектирования и управления жизненным циклом изделия [250]. Компания входит в тройку лидеров рынка решений в области управления жизненным циклом изделий с продуктом Windchill [251] (лидеры PLM – Siemens, Dassault Systèmes) [252]. Среди 11 программных систем [253] компании, есть решения,

используемые в области промышленного интернета вещей (Thingworx) и дополненной реальности (Vuforia). По состоянию на 2020 год в компании работало 6 243 сотрудника, в том числе 1 949 в сфере исследований и разработок [254].

- *Siemens Digital Industries Software* входит в структуру глобальной технологической корпорации Siemens AG [255]. По мнению экспертов это одна из наиболее привлекательных компаний для инвестирования [252; 256], демонстрирующая рост выручки в области цифровизации промышленности (автоматизация производства и программное обеспечение) и прогнозирующая существенное увеличение выручки в 2023 году [257]. В Siemens Digital Industries Software работает более 20 000 сотрудников (по состоянию на 2021 год) [258].

Рассматриваемые компании занимают ведущие позиции в определенном классе программных систем (например, CAD – Autodesk Inc., CAE – ANSYS, PLM – Siemens Digital Industries Software), но как можно заметить в их арсенале также существуют решения различных классов ПО. В процессе развития данных компаний у них стали появляться решения, применяемые в таких смежных областях как искусственный интеллект, виртуальная реальность, большие данные и др.

Рисунок 22. Выручка компаний-лидеров рынка цифрового проектирования и моделирования в 2020-2022 годы (млрд руб.)⁶



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

Рассматриваемые компании представлены более 35 лет на рынке цифрового проектирования и моделирования⁷. К компаниям наиболее длительное время, существующим на рынке можно

⁶ Примечания к рисунку:

1. Данные о выручке разработчиков программных систем цифрового проектирования и моделирования за 2020-2022 годы получены из открытых финансовых отчетов соответствующих компаний.

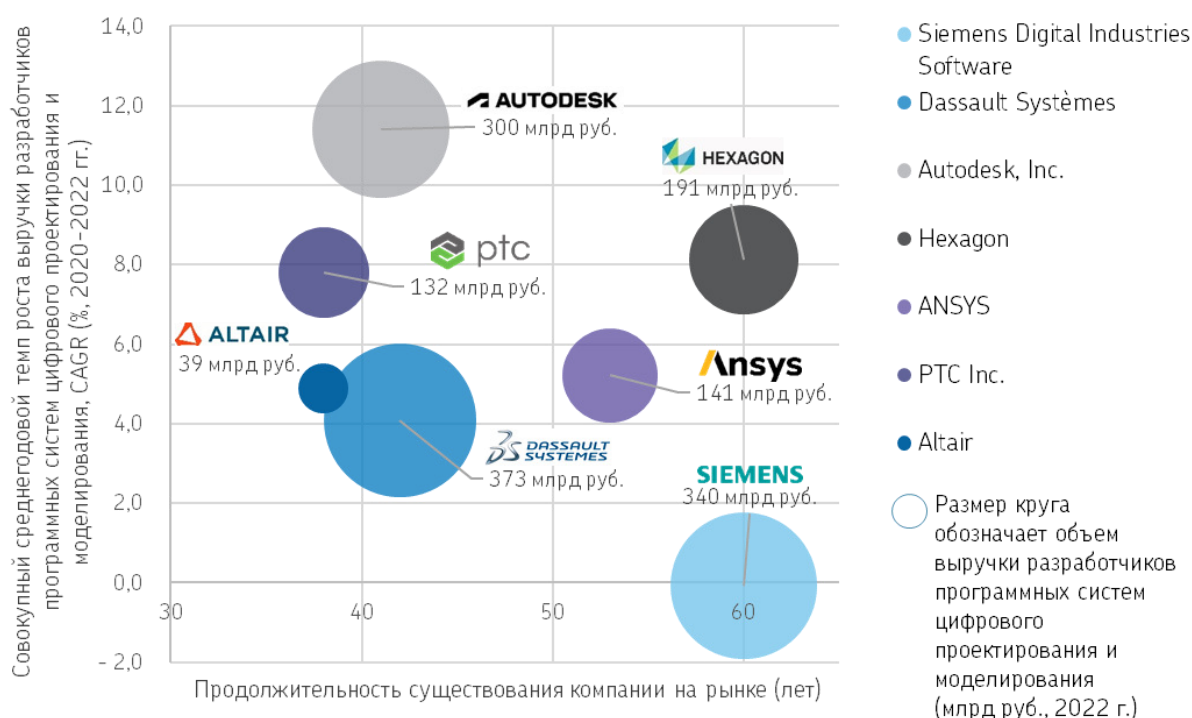
2. Выручка разработчиков программных систем цифрового проектирования и моделирования за 2020-2022 годы рассчитана в рублях Российской Федерации. Перевод иностранной валюты (доллара США и евро) осуществлялся отдельно для каждого года указанного периода согласно среднегодовому валютному курсу, установленному Центральным Банком Российской Федерации.

⁷ Продолжительность существования компании на рынке рассчитывалась с момента создания организации-разработчика программных систем цифрового проектирования и моделирования.

отности: Siemens Digital Industries Software (предшественницей компании является компания – UGS, основанная как United Computing в 1963 году; UGS приобретена Siemens AG в 2007 году), Hexagon AB/ MSC Software (входящая в состав Hexagon AB с 2017 года корпорация MSC Software была основана в 1963 году) и ANSYS, Inc. (основана в 1970 году).

К тройке лидеров по объемам выручки можно отнести Siemens Digital Industries Software, Dassault Systèmes и Autodesk, Inc. За последние три года по совокупному среднегодовому темпу роста выручки лидирует Autodesk, Inc. (11,4%), Hexagon (8,1%) и PTC Inc. (7,8%).

Рисунок 23. Сравнение разработчиков программных систем цифрового проектирования и моделирования по объему выручки, темпам роста выручки за 3 года (2020–2022 годы) и продолжительности существования на рынке⁸



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

⁸ Примечания к рисунку:

1. Данные о выручке разработчиков программных систем цифрового проектирования и моделирования за 2022 год получены из открытых финансовых отчетов соответствующих компаний.
2. Выручка разработчиков программных систем цифрового проектирования и моделирования за 2020–2022 годы рассчитана в рублях Российской Федерации. Перевод иностранной валюты (доллара США и евро) осуществлялся отдельно для каждого года указанного периода согласно среднегодовому валютному курсу, установленному Центральным Банком Российской Федерации.
4. Выручка Hexagon (MSC Software) включает только выручку от продаж программного и аппаратного обеспечения (одно из направлений компании Industrial Enterprise Solutions).
5. Выручка SIEMENS AG включает только выручку компании Siemens Digital Industries Software, входящей в состав корпорации.

3.2. Оценка успешных бизнес-моделей и лучших практик

Настоящий раздел посвящен описанию бизнес-моделей, наиболее распространенных на рынках решений в области цифрового проектирования и моделирования. В рамках исследования, представленного в экспертно-аналитическом докладе, под бизнес-моделью подразумевается способ реализации деятельности организации, обеспечивающий получение дохода и устойчивое развитие [259].

В настоящее время на рынках цифрового проектирования и моделирования существуют различные способы организации деятельности, нацеленной на получение прибыли от реализации готовых решений. Однако несмотря на данные различия, в структуре бизнес-моделей лидирующих организаций могут быть выделены четыре ключевых параметра, вокруг которых выстраивается деятельность.

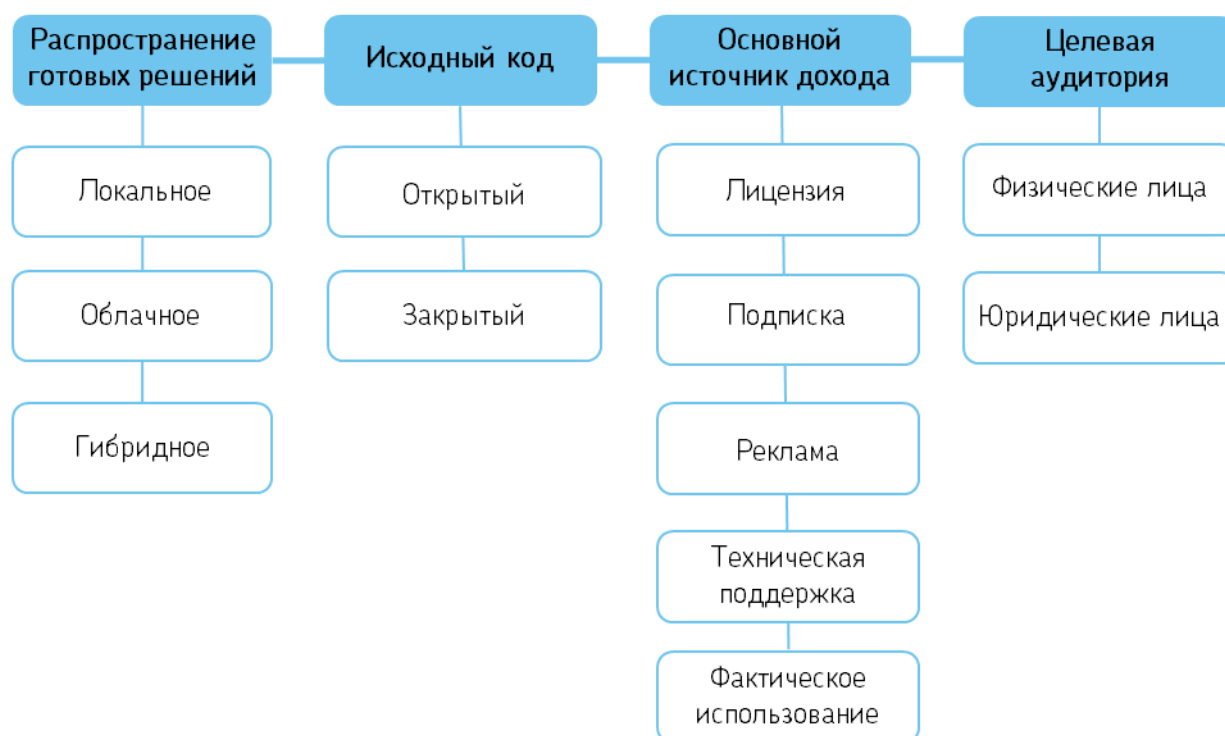
- *Метод распространения готовых решений* отражает способ доставки готового решения от разработчика к конечному потребителю. Основными методами являются (1) установка решений на оборудовании потребителя (локальное распространение), (2) предоставление доступа через облачный сервис (облачное распространение) и (3) комбинация первых двух видов (гибридное распространение).
- *Доступность исходного кода* отражает возможность пользователями вносить изменения в готовое решение. Пользователи решения с открытым кодом имеют право на неограниченную установку, запуск, свободное использование, изучение, распространение и изменение (совершенствование), а также распространение копий и результатов изменения решения. Пользователи решений с закрытым кодом данных прав не имеют.
- *Основной источник дохода* отражает основной способ монетизации решения, не только благодаря фактическому использованию решения потребителем, но также посредством предоставления лицензии (срочной / бессрочной), подписки, оказания рекламных услуг и другого.
- *Целевая аудитория* отражает характер ориентации на конечных потребителей, которые могут быть представлены физическими (Business to Consumer, B2C) или юридическими лицами (Business to Business, B2B) [260; 261].

С точки зрения описанных параметров, могут быть выделены общие черты успешных бизнес-моделей организаций, лидирующих в области цифрового проектирования и моделирования.

- Большинство компаний распространяет решения гибридным способом, предоставляя потребителям возможность как локальной установки решения, так и подключения к облачным сервисам.
- Основная часть решений лидирующих организаций имеет закрытый исходный код, однако некоторые производители, как, например, компания Altair Engineering, позволяют потребителям взаимодействовать с продуктом при помощи создания макросов или добавления новых персонализированных возможностей без изменения «ядра» решения.
- Основным источником дохода для производителей решения являются продажа лицензий (срочная и бессрочная) и подписок. Кроме того, многие производители

- вместе с лицензией на решение предоставляют платную техническую поддержку. Основной целевой аудиторией компаний-лидеров являются юридические лица, что во многом обусловлено высокой ценой и специализацией решений. Так, например, физические лица не заинтересованы в приобретении решений, созданных для оптимизации производственных процессов или требующих высокопроизводительного оборудования.

Рисунок 24. Основные черты бизнес-моделей организаций, ведущих деятельность в области цифрового проектирования и моделирования



Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам AltexSoft, «Software Business Models, Examples, Revenue Streams, and Characteristics for Products, Services, and Platforms», 2018 [262]

Отличным от большинства лидирующих организаций в области цифрового проектирования и моделирования является пример американской компании Altair Engineering.

В рамках своей бизнес-модели Altair Engineering реализует три типа продуктов: собственные программные решения, разработки компаний, присоединившихся к платформе мультидисциплинарного анализа HyperWorks – основному продукту Altair Engineering – путем поглощения со стороны Altair, а также узкоспециализированные решения, разрабатываемые компаниями-партнерами, входящими в Партнерский Альянс Altair (Altair Partner Alliance) и заполняющими те ниши инженерного анализа, которые недоступны в рамках инструментария платформы HyperWorks [263; 264].

Для реализации продукции Altair Engineering использует уникальную модель лицензирования на основе подписки (срочные лицензии), подразумевающую предоставление доступа ко всему перечню предлагаемых программных систем платформы HyperWorks, разрабатываемых непосредственно Altair Engineering, и программных приложений, входящих в Altair Partner Alliance, в

зависимости от количества имеющихся единиц лицензирования – юнитов (Altair Units) – вместо приобретения каждого решения по-отдельности, чем больше юнитов – тем больше различных продуктов доступно пользователю [265]. Также существует и возможность приобретения бессрочных лицензий, при которых система лицензирования юнитами распространяется только на программные системы платформы HyperWorks.

Клиенты компании, имеющие в своем распоряжении срочные лицензии с достаточным количеством юнитов, получают доступ к площадке Altair One Marketplace, на которой, помимо собственно решений платформы HyperWorks, доступно более 80 программных продуктов различной направленности, предлагаемых более чем 80 сторонними разработчиками-партнерами Altair Engineering по всему миру [264; 266].

Модель лицензирования Altair Engineering предполагает оформление пользователем лицензии на продукцию посредством приобретения специализированных юнитов различных функциональных пакетов, расходуемых согласно потребностям инженеров предприятия-клиента. Каждый из программных продуктов доступен в рамках того или иного функционального пакета и требует для запуска определенного количества юнитов. При этом пользователи могут одновременно использовать различные программные системы, расходуя юниты только на наиболее «дорогой» продукт, после чего система лицензирования предоставляет возможность доступа ко всем программным решениям, требующим меньшего или равного количества юнитов в рамках выбранного функционального пакета, при условии, что запуск данных программных систем осуществляется на одной и той же пользовательской машине [264; 265]. Помимо этого, распараллеливание решателей платформы HyperWorks также осуществляется с помощью системы юнитов – чем больше юнитов доступно пользователю, тем на большее количество ядер он может распараллелить решение одной задачи (в тех решателях, для которых предусмотрено использование HPC-технологий).

Данная бизнес-модель позволяет Altair Engineering сохранять высокую привлекательность своего предложения на рынке цифрового проектирования и моделирования за счет широкой продуктовой линейки, вариативности и гибкости технологических решений. Компании-партнеры Altair Engineering, в свою очередь, увеличивают прибыль, получая возможность продажи часов использования своих узкоспециализированных решений (своего рода подход "Software as a service") в рамках более широкой клиентской базы, а именно, тем клиентам, которым не требуется постоянное использование данных решений, но которые, являясь пользователями решений Altair, иногда вынуждены обращаться и к более редким и узкоспециализированным программным системам инженерного анализа, функциональные возможности которых выходят за рамки возможностей, предоставляемых программным инструментарием платформы HyperWorks [263; 264].

3.3. Инвестиции, сделки M&A, кооперация

Настоящий раздел посвящен описанию экономической деятельности компаний, направленной на увеличение капитала и укрепление позиций на технологических рынках. В частности, в разделе рассмотрены различные аспекты инвестиционной деятельности, характерные черты слияний и поглощений основных организаций, а также установление партнерских отношений и сотрудничества на рынках цифрового проектирования и моделирования.

Инвестиционная деятельность компаний представляет собой вложение капитала и осуществление практических действий в целях получения прибыли и /или достижения иного полезного эффекта [267]. Инвестиции в разработку, оптимизацию и улучшение решений в области цифрового проектирования и моделирования повышают конкурентоспособность компаний-разработчиков на рынке, а также способствуют развитию самих технологий.

В 2022 году компании-лидеры увеличили свои ежегодные инвестиции в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в среднем на 20% по сравнению с 2021 годом. Сумма затрат на НИОКР компании Altair Engineering в 2022 году составила более 47 млн долл., компании Ansys – более 433 млн долл., Autodesk и Dassault Systèmes вложили в исследования и разработки более 1,1 млрд долл., компания Hexagon инвестировала более 6 млн долл. в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, PTC и Siemens – 338 млн долл. и 6,14 млрд долл. соответственно [268–274].

Другим важным аспектом развития рынка технологий цифрового проектирования и моделирования является осуществление сделок слияния и поглощения (mergers and acquisitions, M&A) ключевых игроков. Слияния и поглощения представляют собой класс экономических процессов укрупнения бизнеса и капитала, происходящих на макро- и микроэкономическом уровнях, в результате которых на рынке появляются более крупные компании [275]. Поглощение крупными компаниями мелких укрепляет позиции первых, при этом поглощенные компании получают дополнительный толчок в развитии собственных решений за счет возможности использования разнообразных ресурсов крупных игроков рынка.

В рамках исследования был осуществлен анализ слияний и поглощений, совершенных в 2022 году ведущими компаниями на рынке цифрового проектирования и моделирования.

Таблица 4. Сделки слияния и поглощения среди ведущих игроков рынка цифрового проектирования и моделирования

Компания	Описание сделки	Описание приобретенной компании
Altair Engineering	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: нет данных. • Дата: июнь 2022 [276].	Concept Engineering – разработчик программного обеспечения для визуализации электронных систем, предназначенного для помощи инженерам в отладке сложных полупроводниковых конструкций. • Специализация: EDA, CAD. • Страна: Германия. • Год основания: 1990. • Выручка (2022): 0,012 млрд долл. • Количество сотрудников: 15 человек.
Ansys	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: нет данных. • Дата: май 2022 [277].	Motor Design Limited – компания, предоставляющая передовые программные инструменты для проектирования электрических машин. • Специализация: CAD. • Страна: Великобритания. • Год основания: 1998. • Выручка (2022): 0,005 млрд долл. • Количество сотрудников: 15 человек.

Компания	Описание сделки	Описание приобретенной компании
Autodesk	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: нет данных. • Дата: март 2022 [278].	The Wild – компания, предоставляющая иммерсивную платформу удаленного сотрудничества для работы специалистов в области архитектуры, проектирования и строительства (AEC). • Специализация: XR (VR+AR), BIM, CAD. • Страна: США. • Год основания: 2017. • Выручка (2022): 0,004 млрд долл. • Количество сотрудников: 20 человек.
Dassault Systèmes	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: нет данных. • Дата: октябрь 2022 [279].	Diota – компания, предлагающая решение DELMIA Augmented Experience, использующее технологию дополненной реальности для повышения эффективности промышленных операций благодаря контекстуализированным цифровым данным в цеху, помогающим операторам выполнять задачи по сборке продуктов и техническому обслуживанию. • Специализация: AR, Virtual Twin, CAE. • Страна: Франция. • Год основания: 2009. • Выручка (2022): 0,014 млрд долл. • Количество сотрудников: 25 человек.
Hexagon	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: нет данных. • Дата: октябрь 2022 [280].	AVVIR – компания по разработке программного обеспечения, ориентированная на BIM (информационное моделирование зданий), предоставляющая платформу автоматизированного анализа рисков, за счет использования обогащенных моделей BIM и искусственного интеллекта. • Специализация: AI, BIM, CAD. • Страна: США. • Год основания: 2017. • Выручка (2022): 0,002 млрд долл. • Количество сотрудников (2022): 18 человек.
	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: 1,2 млрд долл. • Дата: апрель 2022 [281].	ETQ – поставщик программного обеспечения для управления QMS (система менеджмента качества), EHS (охрана окружающей среды, здоровья и безопасность) и соблюдения нормативных требований на основе SaaS. • Специализация: SaaS, QMS, EHS. • Страна: США. • Год основания: 1992. • Выручка (2022): 0,086 млрд долл. • Количество сотрудников (2022): 200 человек.
PTC	• Тип сделки: поглощение. • Сумма сделки: 0,28 млрд долл. • Дата: апрель 2022 [282].	Intland – компания, разрабатывающая семейство программных продуктов Codebeamer™ для управления жизненным циклом приложений (ALM), включая полностью интегрированное предложение нового поколения с возможностью работы в облаке. • Специализация: ALM. • Страна: Германия. • Год основания: 1992. • Выручка (2022): 0,009 млрд долл. • Количество сотрудников (2022): 65 человек.
	• Тип сделки: поглощение. • Сумма	ServiceMax – компания, предоставляющая облачную программную платформу, предназначенную для повышения производительности

Компания	Описание сделки	Описание приобретенной компании
	сделки: 1,46 млрд долл. • Дата: январь 2023 [283].	выполнения сложных, ориентированных на оборудование услуг для OEM-производителей, операторов и сторонних поставщиков услуг. • Специализация: FSM, PLM. • Страна: США. • Год основания: 2007. • Выручка (2023): 0,15 млрд долл. • Количество сотрудников (2023): 720 человек.

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ

Кроме того, важной составляющей экономической деятельности организаций является установление партнерских отношений на рынке. В 2022 году ведущие игроки на рынке цифрового проектирования и моделирования взаимодействовали в рамках проектов по ключевым технологиям с другими перспективными компаниями.

В конце 2021 года – начале 2022 года немецкая компания Siemens заключила технологическое партнерство с корейскими автомобилестроительными корпорациями Hyundai Motor Company и Kia Corporation с целью ускорить процессы цифровой трансформации этих компаний. Кооперация направлена на создание методов проектирования и разработки индивидуальных решений, учитывающих жизненный цикл всех автомобилей, связанных с ними процессов и видов деятельности, таких как производство, поиск партнеров, НИОКР. В рамках партнерства Siemens предоставляет Hyundai Motor Company и Kia Corporation доступ к Siemens NX и Siemens Teamcenter. Кроме того, Siemens также обеспечивает специализированное профессиональное обучение сотрудников Hyundai Motor Company и Kia Corporation в целях гарантии эффективной эксплуатации программного обеспечения Siemens [284].

Компания Ansys в феврале 2022 года анонсировала начало стратегической кооперации с американской компанией Amazon Web Services (далее – AWS) – дочерней компанией Amazon, специализирующейся на предоставлении товаров и услуг в области облачных вычислительных платформ и интерфейсов прикладного программирования (Application Programming Interface, API). В рамках данного сотрудничества продукция Ansys, а именно Ansys Gateway, получит развертывание на платформах AWS, что поможет в создании оптимальных нагрузок моделирования, обеспечивая масштабируемость и гибкость благодаря доступу к программному обеспечению и решениям для хранения данных из любой точки мира с помощью веб-браузера. Данное решение позволяет клиентам Ansys управлять своими разработками в области автоматизации проектирования электроники, компьютерного проектирования и компьютерного инжиниринга через облако, существенно сокращая расходы на использование. Совместное решение Ansys Gateway powered by AWS доступно на площадке AWS Marketplace и позволяет клиентам получить доступ к существующим приложениям Ansys, а также настроить и соединить программные решения Ansys с приложениями сторонних пользователей [285].

Компании PTC и ITC Infotech в июне 2022 года расширили свою кооперацию, закрыв апрельскую сделку в рамках соглашения по партнерском сотрудничестве. Сделка призвана ускорить инициативы клиентов по цифровой трансформации и внедрению ведущего в отрасли облачного

программного обеспечения Windchill для управления жизненным циклом изделия (PLM) от PTC. По соглашению индийская компания ITC Infotech, один из ведущих мировых поставщиков технологических услуг и решений в области технологического и бизнес-консалтинга, приобрела значительную часть бизнеса PTC по предоставлению PLM-консультаций и профессиональных услуг, включая около 160 PLM-консультантов и специалистов. Кроме этого, на основе сделки было создано новое подразделение компании ITC Infotech, DxF Services, которое объединило PLM-специалистов обеих компаний [286].

В июле 2022 года компания TeamViewer, являющаяся мировым поставщиком решений для удаленного подключения и цифровизации рабочих мест, заключила партнерское соглашение с Siemens Digital Industries Software. В рамках кооперации предполагается интеграция возможностей платформы расширенной реальности Frontline компании TeamViewer в программное обеспечение по управлению жизненным циклом изделия Siemens Teamcenter. Благодаря заключенному соглашению клиенты Siemens смогут улучшить процесс разработки продуктов, основываясь на иммерсивном опыте с интерактивным 3D-контентом, связанным с цифровым двойником продукта. Интегрированный в Teamcenter модуль TeamViewer Frontline Spatial позволит создавать AR-контент на основе PLM-информации без знания программирования [287].

Компания Dassault Systèmes в ноябре 2022 года объявила о создании стратегического партнерства с DXC Technology – американской компанией, оказывающей услуги в сфере информационных технологий, в числе которых аутсорсинг, консалтинг и системная интеграция. В качестве цели стратегического партнерства выступила цифровая трансформация промышленности в странах Латинской Америки. В рамках сотрудничества будет создана широкая интеграционная экосистема, предназначенная для оптимизации и цифровизации промышленных процессов в областях транспорта, инфраструктуры и машиностроения. В рамках уже запланированных проектов в Бразилии, Аргентине и Чили партнерство Dassault Systèmes и DXC Technology будет сосредоточено на развитии технологий цифрового моделирования для управления ресурсами и рабочими процессами, в том числе PLM [288].

В декабре 2022 года немецкая компания Siemens заключила партнерское соглашение с компаниями OnePLM и Инновационным центром квантовых технологий (Quantum Technologies Innovation Centre, QTIC). Инновационный центр квантовых технологий – центр, основанный в Бристольском университете и занимающийся поддержкой исследователей, предпринимателей и начинающих компаний путем предоставления доступа к специализированному оборудованию, финансам, сети инвесторов и бизнес-партнеров. В рамках созданной кооперации будет происходить трехсторонняя поддержка стартапов. Стартапы получают бесплатный доступ или высокую скидку на приобретение программного обеспечения CAD, CAM и CAE через Siemens Solid Edge Startup Programmes – версию программного обеспечения Siemens Solid Edge, разработанной специально для стартапов [289].

Кроме этого, компания Siemens продолжила свою кооперацию с немецкой компанией SAP по созданию решения SAP-Teamcenter, открывающего возможности для интеграции технологий управления жизненным циклом изделия и планирования ресурсов предприятия (Enterprise resource planning, ERP). Стратегическое партнерство Siemens и SAP было основано в июле 2020 года, однако именно в 2022 году завершились ключевые два релиза в рамках дорожной карты интеграции SAP-Teamcenter: релиз двустороннего интерфейса PLM-ERP для промышленного проектирования

и релиз замкнутого цикла инжиниринга и производства с расширенными возможностями оценки воздействия, связью с системой управления производственными процессами и управлением проектами. В последующие два года ожидается углубление интеграции Siemens и SAP, в рамках которой будут доступны возможности ведения спецификаций с подпозициями и подпунктами при разработке продукции, будет осуществлен перенос схемы классов из SAP в Teamcenter и из Teamcenter в SAP, а также будет реализована базовая интеграция SAP Enterprise Portfolio and Project Management с внешней PLM-системой для проектов НИОКР [290].

3.4. Новые крупные проекты: участники, планы, суммы привлеченных инвестиций

Данный раздел посвящен обзору новых проектов на рынках решений в области цифрового проектирования и моделирования. Запуск новых проектов является важным аспектом деятельности компаний, отражающим уровень спроса на технологию и определяющим направление развития рынка, а также влияющим на изменение объемов и темпов роста рынка за счет привлечения новых инвестиций.

Отличительной особенностью рынка цифрового проектирования и моделирования является преобладание регулярных обновлений существующих проектов и решений над появлением новых.

Например, компания PTC выпустила модификацию-обновление для своих CAD- и PLM-решений Onshape и Arena, которое позволяет соединить два решения при помощи одной кнопки и ускорить перенос данных с одного продукта на другой [291], а компания Autodesk продолжила активную работу над своим продуктом Fusion 360, интегрируя в него все больше и больше соответствующих решений [292].

Однако несмотря на актуальную тенденцию в обновлении и совершенствовании существующих решений, в 2022 году был запущен ряд новых перспективных проектов.

В июне 2022 года компания Dassault Systèmes совместно с институтом радиотерапии и радиохирургии им. Х. Хартманна и институтом им. Рафаэля анонсировала запуск проекта VORTHEX – первого в мире кабинета радиотерапии, спроектированного полностью при помощи 3D технологий. Проект использует передовые технологии для поддержки пациентов во время болезни и улучшения их самочувствия во время лечения, позволяя им виртуально протестировать лечение до его начала. Помещение проекта VORTHEX является виртуальным двойником (virtual twin) нового кабинета радиотерапии в институте им. Х. Хартманна. 3D-симуляция точно воссоздает технические аспекты и процедуры лечения, включая помещение, манипулятор робота «Cyberknife» компании Accuray, положение пациента, а также условия и этапы сеансов. Процесс получения виртуального опыта, который впоследствии может быть легко интегрирован в план лечения пациента, проходит под наблюдением медицинского сотрудника института, сопровождающего пациента на этом этапе лечения. Обеспечивая знакомство пациента с местом лечения и оборудованием, проект VORTHEX помогает в доступной форме объяснить пациенту план лечения, позволяет повысить комфорт пациента, снизить уровень его тревоги. Для проекта VORTHEX лаборатория 3DEXPERIENCE компании Dassault Systèmes предоставила необходимые технологические знания и оборудование виртуальной реальности. Лаборатория использовала приложения 3DEXCITE от Dassault Systèmes и инженерные данные реальных процессов для создания различных сценариев и их функций.

Непрерывный поток цифровых данных позволил создать точную виртуальную копию всего помещения и оборудования [293].

В апреле 2022 года немецкая компания Siemens совместно с компанией Pasqal, являющейся мировым лидером в области квантовых вычислений на основе нейтральных атомов, запустила многолетний исследовательский проект, целью которого стало развитие области квантового мультифизического моделирования. Первый этап сотрудничества должен продлиться 3,5 года, в его реализации будут принимать участие как исследователи обеих компаний, так и сотрудники университета Эксетера (Exeter University) – партнера компании Pasqal. Финансированием проекта занимается компания Siemens. Проект опирается на существующий объем данных исследований компании Pasqal в этой области, включая методы решения нелинейных дифференциальных уравнений. В течение многих лет классические компьютеры доминировали в этих методах решения над квантовыми компьютерами, но недавний прогресс Pasqal показал перспективу квантового преимущества в ближайшем будущем. Ожидается, что запатентованные компанией Pasqal квантовые методы решения сложных нелинейных дифференциальных уравнений повысят производительность программных решений Siemens, используемых для компьютерного проектирования и моделирования изделий в автомобильной, электронной, энергетической и аэрокосмической отраслях [294].

Важную роль в развитии рынка цифрового проектирования и моделирования играют стартапы. В период 2017–2022 года согласно базе Crunchbase – базе данных частных и государственных компаний – было запущено более 560 стартапов по технологиям цифрового проектирования и моделирования, из которых 111 CAM-стартапов, 367 CAD-стартапов, 28 CAE-стартапов, 52 HPC-стартапов и 26 PLM-стартапов [295]. Таблица с наиболее успешными стартапами по выбранным технологиям за указанный период представлена в Приложении 5.

3.5. Причины закрытия неудавшихся проектов

В данном разделе представлено описание причин закрытия проектов на рынках решений цифрового проектирования и моделирования. Ключевые причины закрытия проектов демонстрируют основные риски, существующие в рассматриваемой технологической области, а также барьеры, препятствующие развитию соответствующих рынков.

В рамках исследования был проанализирован опыт компаний, полученный в ходе проектов, реализация которых была приостановлена или отменена, на основе чего был сформирован перечень наиболее частых причин закрытия проектов в области цифрового проектирования и моделирования. Среди основных причин можно отметить следующие:

- *Смена курса в направлении развития компании* – изменение вектора в развитии компаний часто сопряжено с их внутренней реорганизацией, включающей временную приостановку или полное закрытие определенных проектов. Примером может послужить американская компания GrabCAD, основанная в 2009 году и специализирующаяся на создании программного обеспечения, в основе которого лежит технология компьютерного проектирования. В 2022 году компания GrabCAD заявила о прекращении функционирования решения GrabCAD Workbench – открытой площадки для управления обменом CAD-файлами, запущенной в 2012 году. Основной

причиной закрытия GrabCAD Workbench стало изменение приоритетов в стратегии компании в сторону перехода к разработке программного обеспечения для создания продукции, способной улучшить процессы аддитивного производства в промышленности. Удаление всех файлов и полное закрытие решения GrabCAD Workbench завершилось 1 июня 2023 года [296].

- *Высокий уровень сложности изделий, разрабатываемых с применением решений цифрового проектирования и моделирования* – сложность воплощения идей и планов компаний на практике нередко приводит к осознанию полной невозможности реализации разрабатываемых проектов, вследствие чего принимается решение об их закрытии или временной приостановке. Примером может послужить проект по разработке трехколесного электромобиля американской компании Elio Motors, запущенный в 2013 году. Транспортное средство, разрабатываемое с использованием технологий CAD / CAM. Несмотря на преимущества используемых решений цифрового проектирования и моделирования, сложность реализации концепции электромобиля, недостаток финансирования, ошибки планирования со стороны руководства и некоторые другие внешние факторы повлияли на ход проекта. До 2019 года неоднократно объявлялся перенос даты выпуска продукта. По состоянию на 2022 год новая дата возможной реализации проекта остается неизвестной [297–299].
- *Высокая стоимость конечного продукта* – в некоторых случаях конечная цена продукции остается высокой несмотря на применение технологий цифрового проектирования и моделирования. В качестве примера может быть рассмотрена японская компания Suzuki, которая в 2017 году потерпела неудачу в Пакистане при запуске продаж автомобиля Ciaz, разработанного при помощи технологий компьютерного инжиниринга. Несмотря на преимущества разработки, достигнутые за счет решений цифрового проектирования и моделирования, цена на автомобиль Suzuki Ciaz превосходила цены автомобилей конкурентов на пакистанском рынке, таких как Toyota Corolla, Honda City и Honda Civic, которые можно считать идентичными с точки зрения технических характеристик. Высокая стоимость разработанного автомобиля была связана с возникшими трудностями в логистике, особенностями производства и сборки автомобилей. В результате компания приняла решение об уходе с рынка и закрытии проекта по реализации автомобиля Suzuki Ciaz в Пакистане [300; 301].
- *Проблема переноса данных* – миграция данных при изменении ключевого программного обеспечения или его обновлении является довольно сложным и трудоемким процессом, вследствие чего нередко становится не только барьером для внедрения технологий, но и причиной закрытия недавно разработанных проектов. В 2016 году шведская компания Ericsson, оказывающая услуги в сфере телекоммуникаций по всему миру, приняла решение о смене своего основного программного обеспечения, отвечающего за управление жизненным циклом изделия. Руководство компании планировало совершить крупные капиталовложения в систему PLM на базе платформы 3DEXPERIENCE компании Dassault Systèmes, осуществив тем самым замену программного обеспечения примерно на 25 000 рабочих местах. Ожидалось, что переход на новую систему займет 14 месяцев, однако процесс потребовал больше времени. Причиной задержки стал перенос данных из одной

- PLM-системы в другую, который сопровождался нарушением целостности данных, возникновением ошибок и потерей данных. После ряда сопутствующих увольнений компания Ericsson отказалась от перехода на решение Dassault Systèmes и продолжила использовать привычное программное обеспечение для PLM [302].
- *Устарелость и неактуальность используемого решения* – стремление повысить конкурентоспособность за счет использования наиболее прогрессивных решений является неотъемлемой частью бизнес-моделей многих компаний, что приводит к таким решениям руководства, как отказ от неактуального технологического решения или его замена на новое решение. В 2010 году британская компания Jaguar Land Rover Automotive начала разработку собственного программного обеспечения iPLM на платформе 3DEXPERIENCE компании Dassault Systèmes, посчитав, что PLM-решение Siemens Teamcenter, ранее используемое Jaguar Land Rover Automotive, не соответствовало требованиям времени. Решение Siemens Teamcenter не устраивало компанию прежде всего по структурным причинам – в период 2010–2014 года архитектура решения еще не была унифицирована. Таким образом, проект по формированию системы управления жизненным циклом на базе продукта Siemens был закрыт в связи с изменениями требований к актуальности продукта, и компания Jaguar Land Rover Automotive в рамках курса на улучшение своих технологических способностей перешла на применение платформы 3DEXPERIENCE в качестве основного продукта для управления жизненным циклом своих изделий [303].
 - *Противоречия и разногласия между заказчиком и исполнителем* – недопонимание, возникающее между компаниями, по поводу добросовестного выполнения договорных обязательств нередко становится причиной закрытия ряда проектов. Так, в 2019 году компания Tachyum, занимающаяся разработкой и производством серверных чипов в рамках технологии суперкомпьютерного инжиниринга, столкнулась с непредвиденными задержками в поставке необходимых компонентов от американской компании Cadence Design Systems, а также с несоответствием качества заказа. Запрашиваемые Tachyum блоки проектирования чипов (IP-blocks) должны были помочь компании своевременно выйти на рынок с семейством универсальных чипов Prodigy. Нарушение договоренностей со стороны Cadence не только не позволили Tachyum вовремя реализовать свой продукт, но и привело к убыткам компании в размере 206 млн долл. [304].

ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКИ НА РЫНКЕ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЯМ «ТЕХНЕТ» НТИ

Глава подготовлена МГУ имени М.В. Ломоносова

В данной главе представлен обзор основных технологий и решений в области цифрового проектирования и моделирования, приведены результаты библиометрического анализа и патентного анализа разработок в мире и в России по исследуемой тематике, а также составлен технологический радар технологий цифрового проектирования и моделирования.

4.1. Основные технологии, применяемые на рынке

Рынок цифрового проектирования и моделирования можно определить как совокупность рынков отдельных технологий (программных систем). В рамках данного аналитического обзора под технологиями цифрового проектирования и моделирования понимается совокупность таких технологий, как:

1. компьютерное проектирование: CAD-системы (CAD, Computer-Aided Design);
2. компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг: CAE-системы (CAE, Computer-Aided Engineering) и HPC-системы (HPC, High Performance Computing);
3. технологическая подготовка производства: CAM-системы (CAM, Computer-Aided Manufacturing);
4. управление данными об изделии: PDM-системы (PDM, Product Data Management);
5. управление жизненным циклом изделий: PLM-системы (PLM, Product Lifecycle Management).

CAD-, CAM-, CAE-, PDM- и PLM-системы в основном используются предприятиями обрабатывающей промышленности с целью ускорения разработки и вывода на рынок продукции, а также сокращения операционных издержек. Ввиду этого разработка, развитие и последующее внедрение систем цифрового проектирования и моделирования, применяемых на рынке, способствует повышению качества конечной продукции (изделий), снижению их себестоимости и увеличению скорости их изготовления.

Ключевыми компаниями-потребителями программного обеспечения (ПО) или программных систем цифрового проектирования и моделирования являются предприятия таких отраслей машиностроения, как автомобилестроение и энергетическое машиностроение, судостроение и кораблестроение, авиастроение, ракетостроение, двигателестроение, непрерывное/ процессное производство, и другие.

Рынок цифрового проектирования и моделирования характеризуется все большей интеграцией различных систем между собой, трендом на внедрение в программные системы технологий обработки больших данных и искусственного интеллекта с целью улучшения процессов обработки данных о продукте и проведения их качественного анализа с предиктивной аналитикой, а также распространением облачных решений, облегчающих совместную работу различных команд.

Несмотря на высокий уровень технологического развития зарубежных цифровых решений, в 2022–2023 годах на российском рынке особо актуален тренд на разработку и развитие отечественного программного обеспечения, которое смогло бы полностью или частично заменить зарубежные аналоги на рынке и стать драйвером роста для цифровизации промышленных предприятий ввиду ухода западных вендоров. Использование эффективных отечественных решений позволит поддерживать уровень конкурентоспособности российских предприятий, а также снизить степень зависимости от зарубежного программного обеспечения.

Компьютерное проектирование (CAD)

Ниже приведена характеристика CAD-систем по ряду признаков: назначение, технологии / решения в основе, эффекты от внедрения и др.

Таблица 5. Характеристика CAD-систем

CAD-системы			
Назначение	Разработка 2D-моделей (автоматизированное создание чертежей)		
	Разработка 3D-моделей (трехмерное параметрическое моделирование поверхностей и объемных тел)		
Технологии/решения в основе	Технологии геометрического моделирования		
	Технологии параметрического проектирования		
Эффекты от внедрения	Ускорение и оптимизация процессов проектирования изделий и/ или систем		
	Повышение точности проектирования изделий		
	Быстрое обнаружение и сокращение количества дефектов продуктов		
	Рост производительности и качества деятельности инженеров-конструкторов		
	Сокращение времени на подготовку конструкторской документации за счет автоматизации процессов		
	Сокращение затрат и времени выполнения заказа на разработку изделия		
Примеры зарубежных разработчиков и их решений	 AUTODESK AutoCAD	 ptc	Creo
	 SIEMENS NX CAD	 ZWSOFT	ZWCAD, ZW3D-CAD
	 DASSAULT SYSTEMES SolidWorks CAD, CATIA	 Gstarsoft	GstarCAD
	 Empyrean EDA Solution		
Примеры отечественных разработчиков и их решений	 АСКОН Компас-3D	 НАНОСОФТ РАЗРАБОТКА nanoCAD	
	 ТОП СИСТЕМЫ T-FLEX CAD		

Источники: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных Practical Guide to Digital Manufacturing, Development and Application of CAD Technology, Big Data in Design and Manufacturing Engineering, каталога совместимости российского ПО, G2, 2023 [305–309]

Все CAD-системы можно разделить на 3 категории [310]:

- системы «легкого» класса: предназначены для 2D моделирования и черчения (AutoCAD);
- системы «среднего» класса: предназначены для 3D моделирования и построения чертежей по 3D моделям (Solid Works CAD, Компас-3D);
- системы «тяжелого» класса: предназначены для работы с большими сборками, т. е. сборочными узлами, включающими в себя тысячи и десятки тысяч деталей (NX CAD, CATIA, PTC Creo).

При этом в 2023 году различия между системами этих классов по функциональности, цене и требуемым вычислительным мощностям постепенно стираются. В 2000-х годах «тяжелые» машиностроительные CAD-системы полноценно функционировали только на специфических и дорогостоящих графических рабочих станциях (Hewlett Packard, IBM). В 2020-х годах данные системы работают на стандартных платформах с обычными объемами оперативной памяти и возможностями недорогих графических адаптеров.

CAD-системы являются средством для автоматизации процессов инженерного проектирования, которое позволяет разрабатывать продукты и системы таким образом, чтобы они наиболее полно отражали требования заказчика. При этом программная инфраструктура CAD-систем способствует ускорению процессов проектирования продукта, одновременно повышая уровень его качества и надежности благодаря гибкости в модификации компьютерной модели. Это достигается в том числе за счет использования технологий параметрического и вариационного 3D-моделирования [311; 312].

В настоящее время различают три основных отраслевых подгрупп CAD-систем: машиностроительные CAD (MCAD – Mechanical CAD), CAD печатных плат (ECAD – Electronic CAD/ EDA – Electronic Design Automation) и архитектурно-строительные CAD (CAD/ AEC – Architectural, Engineering and Construction). Наиболее развитыми являются MCAD-технологии и соответствующий сегмент рынка [313].

Традиционно предприятия автомобильной промышленности являются одними из наиболее заинтересованных в развитии CAD-систем (MCAD и ECAD/ EDA) на большинстве рынков, так как в силу высокой конкуренции и больших объемов производства одной из задач современных предприятий данной отрасли является сокращение сроков производства при сохранении максимально высокого качества всех компонентов автомобиля: ходовой части, коробки передач, двигателя, а также больших литых или штампованных форм. Технологии CAD также активно используются в сферах строительства, иных отраслях обрабатывающей промышленности и проч. [314]

Одним из трендов развития современных CAD-систем является внедрение технологий искусственного интеллекта. Они могут способствовать повышению качества проводимого в режиме реального времени анализа, получению более высокой степени точности прогнозирования, а также интеграции данных из разрозненных (порой несовместимых друг с другом) источников. Компания Autodesk постепенно внедряет искусственный интеллект (в первую очередь – технологии машинного обучения) в CAD-системы: инструмент интерпретирует рукописные заметки, трансформирует данные, полученные из документов другого формата, и разрабатывает предложения по улучшению проекта [315]. Подобные инновационные технологии также разрабатывает Dassault Systèmes: их

инструмент на базе искусственного интеллекта Design Assistant может рекомендовать, какие изменения необходимо внести в конструкцию на основе анализа предыдущих решений, выбранных инженером при проектировании объектов с подобной геометрией [316].

Регион Северной Америки является лидером по выручке на рынке – его долю оценивают в 32,6%, при этом регионы Африки, Ближнего Востока и Азии также показывают значительный рост, в основном за счет внедрения CAD-систем в нефтегазовой отрасли [317]. Среди главных разработчиков CAD-систем на международном рынке можно выделить [318]: Autodesk (США), PTC (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens/Siemens Digital Industries Software (США).

В КНР разработка промышленных CAD-систем определено как одно из приоритетных направлений промышленной трансформации, китайские компании уже предлагают альтернативы AutoCAD: компания ZWSOFT выпускает ПО ZWCAD и ZW3D-CAD, а Gstarsoft – GstarCAD [319; 320].

Особое внимание в КНР уделяется развитию ECAD-систем для печатных плат, занимающих первое место среди передовых технологий полупроводниковой промышленности, где ожидается прорыв [321]. Однако компания Huada Empryeon, лидер страны в этой области, предлагающая EDA Solution, пока не может конкурировать с американскими компаниями по функциональным возможностям ПО и доле на рынке. Ввиду этого правительство КНР инвестирует в исследования и разработки стартапов, которые со временем могут создать более конкурентоспособные ECAD-системы [322].

На российском рынке одним из лидеров в области CAD-систем является компания АО «Аскон», специализирующаяся на создании и интеграции ПО в сфере автоматизации проектной и производственной деятельности. Одним из наиболее известных решений компании в области компьютерного проектирования является «Компас-3D». Крупнейшие российские компании используют «Компас-3D» для своих проектов. Например, в ПАО «Северсталь» впервые запустили изготовленный собственными силами вагоноопрокидыватель, полностью спроектированный в программном решении «Компас-3D» [323].

К популярному российскому ПО также можно отнести nanoCAD от компании АО «Нанософт». Эта система считается максимально приближенной к иностранному ПО AutoCAD как по функционалу, так по интерфейсу [318]. После ухода зарубежных вендоров с российского рынка АО «Силовые машины», энергомашиностроительная компания, входящая в пятерку мировых лидеров отрасли по объему установленного оборудования, выбрала именно nanoCAD вместо решения от компании Autodesk [324].

Другую известную российскую конструкторскую систему, предназначенную для решения различных задач (T-FLEX CAD), выпускает компания ЗАО «Топ Системы». Один из примеров использования T-FLEX CAD – создание сборочной модели системы прожига ячеистых пазов в детали авиадвигателя электроэрозионным методом для ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение», производителя авиационных двигателей [325].

Часть проектов по разработке отечественных CAD-систем на текущий момент находится в процессе реализации. Так, в 2027 году запланировано тиражирование программной системы «супертяжелого» класса, реализуемой на текущий момент Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом (СПбГМТУ) под координацией «Объединенной судостроительной

корпорации» [326]. Данное решение позиционируется как часть единой системы технологической подготовки производства для судостроения. Ее функционал будет в том числе включать инструменты, позволяющие унифицировать конструкторскую, технологическую и производственную информацию, которой обмениваются заказчики, проектные институты и верфи.

В России в настоящее время растет потребность в импортозамещении технологических решений и создании качественного отечественного ПО, отвечающего новым потребностям производства. Хотя технология CAD достаточно хорошо представлена на российском рынке и применяется на многих промышленных предприятиях, сохраняется потребность в развитии отечественных CAD-систем для работы с особо сложными изделиями и в расширении их функциональных возможностей для удовлетворения потребностей предприятий в данном ПО. Для этого в июле 2021 года по инициативе ГК «Росатом» был создан консорциум разработчиков CAD/CAE [327]. В 2022 году Правительственная комиссия по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности утвердила «дорожную карту» по направлению «Новое промышленное программное обеспечение». Среди ответственных за доработку и внедрение российского промышленного ПО – АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация», АО «АвтоВАЗ», ПАО «ГАЗ», АО «Концерн «Калашников», АО «Трансмашхолдинг» и др. [328] Как ожидается, это должно обеспечить стабильный рост экономики страны, ускорить новый технологический виток и сделать российское производство полностью независимым в сфере технологий [329].

Компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг (CAE, HPC)

Компьютерный инжиниринг предполагает применение программных систем, позволяющих на основе математических моделей разных классов и уровней сложности (в самых общих случаях, описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных) исследовать поведение материалов, физико-механических и технологических процессов, машин и конструкций в процессе решения многомерных исследовательских и промышленных задач. Для эффективного решения таких задач применяются численные методы (метод конечных элементов (далее – МКЭ), метод конечных разностей (далее – МКР), метод конечных/ контрольных объемов (далее – МКО) и др.) [330]. Ниже приведена характеристика CAE-систем по ряду признаков.

Таблица 6. Характеристика CAE-систем

CAE-системы	
Назначение	Анализ кинематики механизмов
	Анализ напряжений в деталях и сборках с применением МКЭ
	Моделирование динамических механических взаимодействий
	Анализ тепловых и жидкостных потоков методами вычислительной гидрогазодинамики
	Моделирование технологических процессов
Технологии/ решения в основе	Технологии 3D-моделирования
	Технологии вычисления механических характеристик конструкции

CAE-системы				
	Технологии моделирования воздействия нагрузок различной природы			
Эффекты от внедрения	Сокращение затрат и времени на разработку продукта			
	Улучшение качества и надежности изделий			
	Сокращение количества и повышение результативности проводимых испытаний опытных образцов			
	Снижение затрат в случае непредвиденных поломок изделия благодаря учету предела прочности изделия			
Примеры зарубежных разработчиков и их решений		Ansys		NX CAE
		HyperWorks		ZWMeshWorks, ZWSim-EM
Примеры отечественных разработчиков и их решений		APM		CAE Fidesys
		PRADIS		Логос

Источники: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных Siemens, Practical Guide to Digital Manufacturing, каталога совместимости российского ПО, G2, 2023 [305; 308; 331; 332]

Для вычисления механических характеристик конструкции решаются задачи кинематики, статики, динамики и устойчивости. Однако для полноценного анализа изделия недостаточно лишь вычислений его механических характеристик, потому дополнительно может быть разработана модель изделия, подвергающегося одновременному воздействию нескольких нагрузок, имеющих разную физическую природу: тепловые, механические, гидроаэродинамические нагрузки, воздействие электрических и магнитных полей, облучение потоком заряженных частиц [333].

Спектр отраслей для применения CAE-систем довольно широк. Американская профессиональная организация автогонок Hendrick Motorsports сотрудничает с Siemens и с 1990-х годов использует технологии NX CAE для разработки двигателей. Сегодня компания использует CAE-системы для проектирования и оптимизации производительности своих гоночных автомобилей: инструменты проектирования и анализа в NX CAE позволяют инженерам команды виртуально создавать и тестировать поведение изделий, что способствует максимизации мощности и производительности автомобилей на трассе без существенных материальных затрат [334]. Hendrick Motorsports работает над предотвращением нарушения работоспособности деталей, используя анализ данных о прошлых ошибках с помощью CAE-систем [335].

Среди мировых компаний-лидеров в области разработки CAE-систем можно выделить [236; 336; 337]: Ansys (США), Altair Engineering (США), Siemens/Siemens Digital Industries Software (США).

Российский рынок CAE-систем характеризуется наличием ряда продуктов, однако многие российские решения достаточно узкоспециализированы, обладают ограниченными вычислительными мощностями, не позволяя строить расчетные сетки и обрабатывать результаты моделирования для очень сложных изделий, состоящих из десятков тысяч деталей [338].

Одним из российских разработчиков прикладного ПО для CAE является ООО НТЦ «АПМ».

Компания предлагает ПО, ориентированное на разные сферы деятельности [339]:

- APM Civil Engineering для промышленного и гражданского строительства;
- APM WinMachine для прочностных расчетов и проектирования конструкций, деталей машин и механизмов в области машиностроения;
- APM Multiphysics для моделирование процессов теплопередачи, электромагнитных полей, течения жидкости и газа, проектирование деталей машин и их соединений, расчеты прочности.

Пример использования технологий CAE в российской автомобильной промышленности – прочностной расчет рамы и кузова полуприцепа-самосвала НЕФАЗ 9509–30 для ОАО «Нефтекамский автозавод», выполненный ООО НТЦ «АПМ» с помощью программного продукта APM WinMachine. На базе предоставленных заказчиком данных (модель рамы и кузова полуприцепа-самосвала, сведения о нагрузках, действующих на полуприцеп, используемые материалы) сотрудники ООО НТЦ «АПМ» смоделировали элементы полуприцепа с помощью пластинчатых конечных элементов. Для оценки прочности использовались технологии моделирования разных типов нагрузок. По полученным данным были сформированы карты напряженного и деформированного состояния конструкции рамы и кузова при соответствующих комбинациях нагрузок. Затем была проведена оптимизация конструкции рамы и кузова, которая привела к снижению массы изделия: металлоемкость снизилась на 781 кг (12% от исходной модели полуприцепа). При этом в модель вводились усиливающие элементы, локально повышающие прочностные характеристики конструкции [340].

Также российские промышленные компании используют CAE-системы таких разработчиков как ООО «Фидесис» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (Госкорпорация «Росатом»). ООО «Фидесис» является разработчиком российской системы моделирования CAE Fidesys, с помощью которой может быть осуществлен полный цикл инженерных прочностных расчетов [341]. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» выпускает ПО «Логос», предназначенное для суперкомпьютерного моделирования и инженерного анализа в интересах высокотехнологичных отраслей промышленности, науки и образования. К возможностям данной системы, реализуемым благодаря функционалу геометрического ядра, относят [342]:

- получение контактных областей тел для генерации согласованной расчетной конечно-элементной сетки на сложных моделях;
- упрощение геометрии (удаление фасок, скруглений, отверстий и подобного), используемое для идеализации модели при проведении анализа;
- построение срединных поверхностей для подготовки к моделированию задач прочности в оболочечном приближении.

Иной CAE-системой отечественного производства является ПО PRADIS, разработанное компанией ООО «Ладуга», основная деятельность которой направлена на предоставление услуг инжиниринга в области автомобилестроения. PRADIS является средством системного моделирования, которое предоставляет пользователю возможности моделирования и анализа различных комплектующих. Система содержит в себе базу данных из более 160 моделей и построена на принципе универсальности, что позволяет выполнять инженерный анализ любых технических систем [343].

В связи с усложнением конструкции моделируемых изделий и растущими требованиями к их техническим характеристикам, с помощью CAE-систем необходимо решать более сложные задачи, требующие значительных вычислительных ресурсов. Увеличение производительности программ-решателей в CAE-системах позволяет быстрее выполнять задачи моделирования за счет наличия возможности производить большее число сложных расчетов за единицу времени, снижая количество необходимых испытаний для выполнения всех требований производства и поиска идеальной конфигурации проектируемой конструкции. Это способствует быстрому выводу конкурентоспособной продукции на рынок [344]. В связи с этим при с CAE-системами используются технологии суперкомпьютерного инжиниринга – HPC, позволяющие быстро обрабатывать данные и выполнять сложные вычисления за счет суперкомпьютера, содержащего множество вычислительных узлов (ядер), работающих одновременно с целью выполнения одной или нескольких параллельных задач [345]. Средства HPC являются средством решения основной проблемы современного компьютерного инжиниринга: ограничения анализа и скорости решения задач из-за недостаточной производительности и объема памяти имеющихся систем [346]. Далее в таблице представлены примеры программной и аппаратной части HPC-систем.

Таблица 7. Характеристика HPC-систем

HPC-системы	
Назначение	Параллельная обработка данных
	Ускоренная обработка больших многомерных объемов данных
	Решение сложных нелинейных задач
	Моделирование процессов аэро-, гидро-, газодинамики, теплопереноса, турбулентного перемешивания, прочности, деформации и др.
Технологии/решения в основе	Технологии массовых параллельных вычислений
	Кластерные технологии
	Высокопроизводительные компоненты (сетевая и аппаратная инфраструктура, память, хранилище, файловые системы)
	Технологии вычисления механических характеристик конструкции
	Технологии моделирования воздействия нагрузок различной природы
Эффекты от внедрения	Сокращение времени, необходимого для получения результатов расчетов
	Решение сложных задач с большей точностью
	Качественная обработка информации больших объемов за короткое время
	Ускорение обработки моделей сложных многотельных деталей с различным количеством конечных элементов и их типов
	Сокращение количества испытаний до необходимого минимума
	Повышение качества и надежности моделируемых изделий
Примеры зарубежных разработчиков и их решений	Программное обеспечение
	 Ansys HPC, Ansys Fluent, Ansys LS-DYNA
	 Altair HPC, Altair Unlimited

HPC-системы	
Примеры отечественных разработчиков и их решений	Аппаратное обеспечение
	 HPE Cray XD2000, HPE Cray EX2500
	 Tundra Extreme Scale for HPC
	Программное обеспечение
	 Логос
	 CAE Fidesys (Модуль Fidesys HPC)
	Аппаратное обеспечение
	 PCK Торнадо

Источники: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных Hewlett Packard Enterprise, СПбПУ, NetApp, 2023

Компания Altair Engineering, Inc. объединяет аппаратное обеспечение и CAE-систему в своей продуктовой линейке на базе платформы HyperWorks: интеграция с технологией HyperWorks Unlimited позволяет использовать облачные вычисления и/или вычисления на локальной специализированной многоядерной машине Altair, снабженной процессорами Intel Cascade Lake для решения сложных задач нелинейной динамики или гидрогазодинамики [344]. Программная система решения задач нелинейной динамики Altair RADIOSS, базирующаяся на платформе мультидисциплинарного анализа Altair HyperWorks и имеющая возможность использования технологии HPC, в том числе и с помощью HyperWorks Unlimited, используется для расчета автомобильных краш-тестов, падений и ударов, жестких посадок летательных аппаратов, баллистических и взрывных воздействий с высокой скоростью деформаций конструкции. Решение RADIOSS может быть интегрировано с другими продуктами компании, OptiStructFEA, OptiStruct и AcuSolve, совместная работа (каплинг) которых позволяет с заданной точностью предсказать поведение изделия под различными типами нагрузок и при сложных комбинациях нагружения. Программную систему Altair RADIOSS, зачастую в совокупности с другими решателями платформы HyperWorks, применяют в различных отраслях, требующих особо сложных расчетов, например, в авиастроении, где Altair Engineering сотрудничает со многими разработчиками и производителями в области моделирования птицестойкости и градостойкости конструкций. Такое сочетание технологий CAE и HPC может способствовать улучшению качества процессов оптимизации конструкции летательного аппарата и расчета оптимальной массы его отдельных компонентов, а также повышению безопасности конечной конструкции [349].

Российский рынок характеризуется недостаточным использованием отечественных CAE- и HPC-систем в промышленности. Долгие годы предпочтение отдавалось зарубежным аналогам с более широким функциональным охватом, но потребность в импортозамещении ПО CAE является стимулом для более активной работы по совершенствованию существующих и разработке новых продуктов для российского рынка, и, вероятно, будет способствовать развитию аппаратных решений в этой области.

В центре коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова расположен один из мощнейших суперкомпьютеров, вошедший

в мировой рейтинг ТОП-500-«Ломоносов-2», который функционирует на базе отечественных аппаратных решений [350]. Он используется более чем 500 научными группами, представляющими основные подразделения университета, институты РАН и другие научные учреждения России. Ввод в строй суперкомпьютера «Ломоносов» позволил решить ряд задач отечественных промышленных предприятий России. Так, для РКК «Энергия» с помощью «Ломоносова» были проведены расчеты обтекания перспективного космического корабля «Русь» при торможении в атмосфере Земли и посадки на ее поверхность. На «Ломоносове» также была решена задача о массотеплообмене в устройстве сепарации окислов натрия в первом контуре перспективного ядерного реактора, разрабатываемого ОКБМ им. И.И. Африкантова [351].

Инжиниринговый центр (CompMechLab®) «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ также реализует проекты для компаний высокотехнологичных отраслей промышленности (АО «ТВЭЛ»/Госкорпорация «Росатом»; АО «ОДК»/Госкорпорация «Ростех» и другие) с использованием вычислительных мощностей Суперкомпьютерного центра «Политехнический» (это более 50 тыс. ядро-часов работы в сутки [352]), который запущен в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого в 2015 году [347; 353].

Перспективным направлением развития НРС технологий является организация работы с большими группами виртуальных машин, связанных одним функционалом. Отечественным разработчиком ООО «ЭЙЧПИСИ ХАБ РИСЕРЧ» разрабатывается облачный сервис НРС HUB, который позволит биоинформатикам, геофизикам и рендерщикам решить проблему недостатка вычислительных мощностей в пиковой клиентской нагрузке и избежать издержек, связанных с покупкой собственных дорогостоящих аппаратных модулей [354]. Это позволит сделать высокопроизводительные вычисления более доступными и легко масштабируемыми для широкого круга потребителей, реализующих собственную научно-технологическую и производственную деятельность.

Технологическая подготовка производства (CAM)

Применение CAM-систем способствует оптимизации проектирования технологических процессов в цифровой среде до начала изготовления изделий с учетом влияния различных технологических факторов на производство для минимизации количества конструкторских и технологических ошибок, а также разработке и последующей оптимизации управляющих программ для различных типов станков [305; 355]. Ниже приведена характеристика CAM-систем по ряду признаков.

Таблица 2. Характеристика CAM-систем

CAM-системы	
Назначение	Предоставление функционала для разработки G-кода с учетом различных материалов изделий, типов обработки, станков и инструментов
	Определение размеров и допусков при обработке изделия на станках с ЧПУ
	Контроль перемещения инструмента относительно рабочих элементов и других геометрических элементов
	Контроль качества обработки изделия

CAM-системы			
Технологии/ решения в основе	Технологии многоосевой обработки		
	Технологии 3D-моделирования		
Эффекты от внедрения	Ускорение и оптимизация изготовления изделий		
	Повышение точности и качества изготовления заготовок		
	Сокращение затрат на изготовление изделия		
	Снижение влияния человеческого фактора на производство		
	Сокращение производственных потерь		
Примеры зарубежных разработчиков и их решений	 NX CAM, Solid Edge CAM	 SolidWorks CAM	
	 Fusion 360, FeatureCAM, Inventor CAM		
Примеры отечественных разработчиков и их решений	 Компас-3D: Модуль ЧПУ		
	 SprutCAM	 ADEM	

Источники: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных каталога совместимости
русского ПО, G2, 2023 [308; 356]

Благодаря большому количеству поставщиков CAD-систем и широкому применению технологии в производстве, регион Северной Америки занимает около 40% мировой доли рынка, конкурируя только с Европой [357]. Среди главных поставщиков CAM-систем на международном рынке можно выделить [358–360]: Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens/Siemens Digital Industries Software (США).

Успешное внедрение CAM-систем было реализовано в компании JK Machining. JK Machining занимается проектированием и производством пресс-форм для пластмассовых изделий, и использование CAM-систем предоставляет возможность сохранения конкурентного преимущества на мировом рынке. Благодаря использованию NX CAM компании удалось сократить время изготовления оснастки, используемой в автомобилестроении с 18–22 недель до 10–12 недель с сохранением высокого уровня качества изделий. Компания также смогла автоматизировать весь процесс производства пресс-форм, добиться ускоренного написания управляющих программ (сокращение времени работы от нескольких часов до нескольких минут), начать использовать технологию 5-осевой обработки [361].

На российском рынке одним из лидеров в сфере CAM-систем является компания ООО «СПРУТ-Технология», предлагающая ПО SprutCAM. Решение SprutCAM позволяет уже на этапе расчета траектории движущихся частей станка учитывать особенности его кинематической модели и результаты предыдущих решений проектирования производственных процессов объектов с подобной геометрией, а также помогает полноценно моделировать процесс обработки детали с учетом особенностей оборудования [362].

Использование SprutCAM позволило ООО «НПФ» Анком» (производственное предприятие,

работающее в двух направлениях: изготовление и ремонт гребных винтов, гребных валов и проч.; изготовление спирально-тросовых виброизоляторов и упруго-демпферных виброопор [363]) в 2017 году отказаться от услуг сторонних специалистов по разработке управляющих программ для станков с ЧПУ для производства гребных винтов, которые не предполагали оперативного внесения изменений в программу по ходу обработки, поэтому возникали простои оборудования. ПО Sprut-CAM позволило компании самостоятельно разрабатывать управляющие программы для станков с целью оптимизации процессов производства гребных винтов (изделия сложной системы обмера, обусловленной труднодоступностью некоторых поверхностей и необходимости точного воспроизведения чертежной геометрии изделия). Добиться высокой точности при изготовлении элементов винта на универсальном металлообрабатывающем оборудовании невозможно, а использование САМ-системы позволило ООО «НПФ» Анком» повысить скорость изготовления сложных деталей и обеспечить высокое качество конечного продукта.

Сейчас программные решения САМ занимают уверенную позицию на российском рынке, однако инструменты отечественных САМ-систем не всегда являются универсальными и подходящими для повсеместного использования на различных промышленных предприятиях. В соответствии с актуальными направлениями государственной политики и общероссийской повестки на импортозамещение зарубежного ПО развитие отечественных САМ-систем является актуальной задачей российских разработчиков.

Управление данными об изделии (PDM)

PDM-системы, как правило, используются для обеспечения безопасного управления данными, оптимизации процессов разработки, подготовки производства и управления конфигурацией изделия [365].

Таблица 8. Характеристика PDM-систем

PDM-системы	
Назначение	Сбор, управление и предоставление информации об изделии
	Синхронизация данных спецификации и иной информации об изделии
	Визуализация данных (спецификаций, конструкторской документации, материалов и проч.) об изделии в формате макетов
	Обеспечение коммуникации между внутренними и внешними пользователями
Технологии/решения в основе	Технологии управления информацией об изделии (техническая информация, инженерные данные, изображения, чертежи, модели и проч.)
	Технологии электронного документооборота конструкторско-технологической информации
Эффекты от внедрения	Обеспечение эффективной совместной работы команд, участвующих в разработке изделия и конструкторско-технологической подготовке производства
	Сокращение количества ошибок в процессе разработки изделия
	Быстрый доступ к необходимой информации
	Сокращение времени выхода на рынок новых изделий

PDM-системы			
	Подготовка оперативной и достоверной информации об изделии		
Примеры зарубежных разработчиков и их решений	 AUTODESK	Fusion 360 Manage with Unchain, Value	
	 DASSAULT SYSTEMES	SolidWorks PDM	 SIEMENS Solid Edge
Примеры отечественных разработчиков и их решений	 AZCON	ЛОЦМАН:КБ	
	 ADEM CAD/CAM/CAPP/PDM	ADEM	 1С ЦЕНТР СЕТЕВОЙ КОМПЕТЕНЦИИ 1C:PDM

Источники: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных PTC, Siemens, каталога совместимости российского ПО, 2023 [365–368]

Для базовых PDM-систем характерно наличие функций хранения данных, управления документами, их версиями, а также контроля доступа, управления проектами и рабочими процессами. ПО более высокого уровня, используемое на крупных предприятиях с продукцией, в разработке которой принимают участие различные команды, имеет большую гибкость и предоставляет возможность объединения распределенных данных об изделии для повышения эффективности процессов его разработки. Это позволяет своевременно получать доступ к данным об изделии и изменять их [369].

В рамках работы с PDM-системой имеется возможность группировки данных об одном изделии, оперативного внесения и подтверждения изменений в инструкциях и чертежах, контроля действий разных пользователей с помощью технологий управления процессами работ.

PDM-системы также тесно связаны с результатами работы CAD-систем и созданными с их помощью 2D- и 3D-моделями и чертежами. Интеграция PDM- и CAD-систем обеспечивается за счет [370]:

- предварительного просмотра 2D- и 3D-моделей из CAD в интерфейсе PDM;
- запуска приложения CAD из интерфейса PDM;
- поддержки иерархии CAD-моделей.

Среди мировых разработчиков CAM-систем можно выделить: Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens/Siemens Digital Industries Software (США).

Канадская компания Rokinon, производящая электромобили для тяжелой и горнодобывающей промышленности, использует программу Vault от Autodesk для управления данными на своем производстве. Vault позволяет компании не только управлять данными, но и обеспечивать коммуникацию между разными командами, например, между отделом исследований и разработок и производственным цехом. Отслеживание изменений и цифровизация данных позволяют компании оптимизировать производство и быстрее выпускать новые продукты на рынок [371].

На российском рынке, несмотря на то, что имеются разработчики ПО для автоматизации производства, отечественные решения, в том числе PDM-системы, не в полной мере соответствуют требованиям комплексных и сложных производств, специализирующихся на проектировании и дальнейшем производстве авиационных запчастей, энергетических турбин, автомобилей и проч. [372]

При этом на рынке можно выделить компанию АО «Аскон» и ее продукт ЛОЦМАН:КБ. Это типовое решение, предназначенное для создания и управления электронным архивом конструкторской документации. Система позволяет создавать и редактировать архив электронных структур изделия, обеспечивать функционирование среды коллективной разработки на дистанционной основе, автоматизировать процедуры согласования документов и отслеживать вносимые в изделие и базу данных изменения [373]. Так, ЗАО «Уралтехфильтр-Инжиниринг»⁹, увеличив число производимых изделий, столкнулась с увеличением объема конструкторской документации, что привело к сложностям в отслеживании изменений в сборках и деталях [374]. С помощью ЛОЦМАН:КБ компании удалось автоматизировать отслеживание изменений в сборках и сборочных единицах, в которые входит измененная деталь [76].

Разработанное компанией ООО «1С» решение 1С:PDM является многофункциональной платформой, которая предоставляет пользователям возможность управления характеристиками проектируемого изделия, технологическими процессами, управления архивом данных, а также коммуникацией между разработчиками. Встроенный в 1С:PDM единый модуль интеграции, позволяющий управлять первичной информацией о цифровом двойнике изделия, совместим как с отечественными, так и с зарубежными CAD-системами, а также предоставляет возможность удаленной работы над проектом для сотрудников различных подразделений. Данный продукт уже был внедрен на предприятиях ООО «ВМК «ВГТЗ», АО «Усть-Каменогорский Арматурный завод», ЗАО «Газоразделительные системы» и проч. [375]

Российские решения для PDM-систем слабо представлены на рынке, их часто рассматривают в совокупности с системами PLM. Для роста числа разработок в этом направлении и широкого внедрения на предприятиях требуются финансовые инвестиции и совместная работа компаний-разработчиков и промышленных предприятий для выявления и удовлетворения потребностей рынка.

Управление жизненным циклом изделий (PLM)

Технологические решения PLM агрегируют и интегрируют данные как рассмотренных ранее систем управления разработкой и подготовкой производства CAD, CAM, CAE и PDM, так и систем управления, а именно – систем планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning, ERP), планирования потребности в материалах (Material Requirements Planning, MRP), управления производством (Manufacturing Execution System, MES), управления взаимоотношениями с клиентами (Customer Relationship Management, CRM) [376]. PLM-системы позволяют быстро и гибко реагировать на изменяющиеся потребности конкретного заказчика и рынка в целом, а также производить учет вносимых в конструкцию изделия изменений.

Таблица 9. Характеристика PLM-систем

PLM-системы	
Назначение	Сбор, хранение и предоставление информации об изделии на всех стадиях жизненного цикла

⁹ Компания ЗАО «Уралтехфильтр-Инжиниринг» является разработчиком и производителем фильтрующих элементов для технологической очистки газов и жидкостей – в основном для нефтегазовой отрасли.

PLM-системы				
	Анализ, контроль качества и валидация данных об изделии на всех стадиях жиз- ненного цикла			
	Управление требованиями, регламентами, документацией и отчетностью на всех стадиях жизненного цикла изделия			
	Предоставление возможности различным функциональным командам синхронно работать над разработкой изделия			
	Визуализация данных об изделии из различных систем проектирования и модели- рования			
Технологии/ решения в основе	Технологии управления информацией (информация об изделии, техническая ин- формация, инженерные данные, изображения, чертежи и модели)			
	Технологии электронного документооборота конструкторско-технологической ин- формации			
	Технологии контроля управления процессами проектирования и моделирования изделия и связанной с ними информацией			
	Технологии контроля качества продукции			
	Технологии управления изменениями и конфигурациями			
Эффекты от внед- рения	Повышение качества, безопасности и надежности продукта			
	Сокращение сроков вывода продукта на рынок			
	Быстрая идентификация новых возможностей продаж			
	Снижение затрат, связанных с производством и реализацией продукта			
	Совершенствование процессов планирования процессов разработки и производ- ственной подготовки изделий			
	Сокращение сроков модернизации и оптимизации продукции			
	Подготовка оперативной и достоверной отчетности о жизненном цикле продукта			
Примеры зару- бежных разработ- чиков и их реше- ний		Teamcenter		Windchill
		3DEXperience		Oracle Fusion Cloud PLM
Примеры отече- ственных разра- ботчиков и их ре- шений		ЛОЦМАН:PLM		Appius-PLM
		T-FLEX PLM		CAPUS.PLM

Источники: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных Oracle, PTC, G2, 2023 [377–379]

Мировыми лидерами в сфере PLM-решений являются [380]: Siemens/Siemens Digital Industries Software (США), Dassault Systèmes (Франция), PTC (США).

Siemens предлагает широкий ассортимент инструментов для интеграции различных подсистем в рамках единой организационно-технической системы PLM. Продукт Teamcenter от компании Siemens представляет собой интегрированный набор PLM и PDM решений. Интеграция системы Teamcenter с другими информационными системами предприятия (ERP, CRM, MRP) достигается за счет другого решения от Siemens – Active Integration. Компания также предлагает продукт для облачного хранения информации Omneo, которое позволяет обрабатывать и анализировать

большие данные, хранящихся в информационных системах предприятия [381].

PLM-решением от компании Dassault Systèmes является комплексное ПО 3DEXperience. В рамках экосистемы 3DX интегрируются PDM-решение ENOVIA, CAD-система CATIA и другие платформенные решения от Dassault Systèmes [382].

Одним из наиболее известных решений от компании PTC в сфере PLM является Windchill. Это семейство продуктов, предназначенное для организации управления жизненным циклом изделия, которое включает в себя системы для совместного управления проектами (Windchill ProjectsLink), для категоризации и поиска (Windchill PartsLink), а также ПО для системной аналитики, обеспечивающее оценку и анализ стоимости продукта в режиме реального времени (Windchill Cost) и оценивающее расход материалов в соответствии с спецификацией продукта (Windchill Materials & Substances). Компания также предоставляет специальные отраслевые решения, такие как Flex-PLM – для компаний легкой промышленности [383].

Российский рынок PLM решений представлен различными вендорами, например, ЗАО «ТОП-системы», АО «Аскон». ПО T-FLEX PLM от компании ЗАО «Топ Системы» является полномасштабным решением в области управления жизненным циклом изделий и организации деятельности предприятий. В основе продукта лежит набор программ T-FLEX CAD/ CAM/ CAE/ PDM/ CRM и др. Функционал системы позволяет управлять проектами и планировать распределение ресурсов, вести полный цикл документооборота и администрирования в разрезе процессов разработки и производства изделий. Открытость платформы T-FLEX PLM предполагает наличие возможности по расширению комплекса и созданию собственных информационных систем в рамках единого информационного пространства предприятия [384].

PLM-решением от компании АО «Аскон» является продукт ЛОЦМАН:PLM. Ключевой функционал платформы – управление документацией и информацией о продукте, технологией изготовления, а также данными о сотрудниках, подразделениях и бизнес-процессах инженерной деятельности предприятия [385]. Успешное внедрение данной отечественной PLM-системы осуществило ОКБ «Факел», специализирующееся на разработке и изготовлении электрореактивных двигателей. Компания использовала отечественное ПО САПР ТП Вертикаль и ЛОЦМАН:PLM от компании АО «Аскон» для цифровизации документооборота конструкторской документации. Ключевыми результатами от внедрения данного ПО являются: формирование электронного архива, сокращение работы над проектами, создание нескольких внутренних стандартов, закрепляющих цифровые нововведения [386].

В 2022 году ГК «Росатом» анонсировала выпуск системы управления жизненным циклом продукта САРУС.PLM на базе российской операционной системы Astra Linux [387], на использование которой рекомендуется перейти крупным российским промышленным государственным предприятиям [388]. Разработчиком системы САРУС.PLM выступает ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Скорость разработки зависит от технологического уровня развития ключевых систем цифрового проектирования и моделирования (CAD, CAM, CAE, PDM). Поэтому развитие отечественных PLM-систем, соответствующих специфике российского рынка, будет возможно только при одновременном совершенствовании уже имеющихся на рынке систем цифрового проектирования и моделирования и/или разработке новых.

4.2. Обзор ключевых научных разработок в России и мире по результатам библиометрического и патентного анализа

Одними из ключевых индикаторов, позволяющих сформировать базовое представление о степени заинтересованности компаний и предприятий страны в реализации научно-исследовательской деятельности, являются публикационная и патентная активности в разрезе заданной предметной области. Отдельно стоит отметить, что результаты патентного анализа в большей степени отражают области коммерческого интереса предприятий страны, поскольку они являются теми направлениями научно-технологического и инновационного развития, в разрезе которых организации выделяют значительное количество ресурсов для разработки и регистрации интеллектуальной собственности.

4.2.1. Результаты библиометрического анализа

В целях осуществления инновационной деятельности и разработки перспективных технологичных решений в сфере цифрового проектирования и моделирования отечественные и зарубежные компании реализуют по данной тематике научно-исследовательские работы. Анализ публикационной активности был реализован на основе данных библиографической и реферативной базы данных Scopus за 1980–2023 годы (начало развития технологий моделирования приходится на 1980 годы).

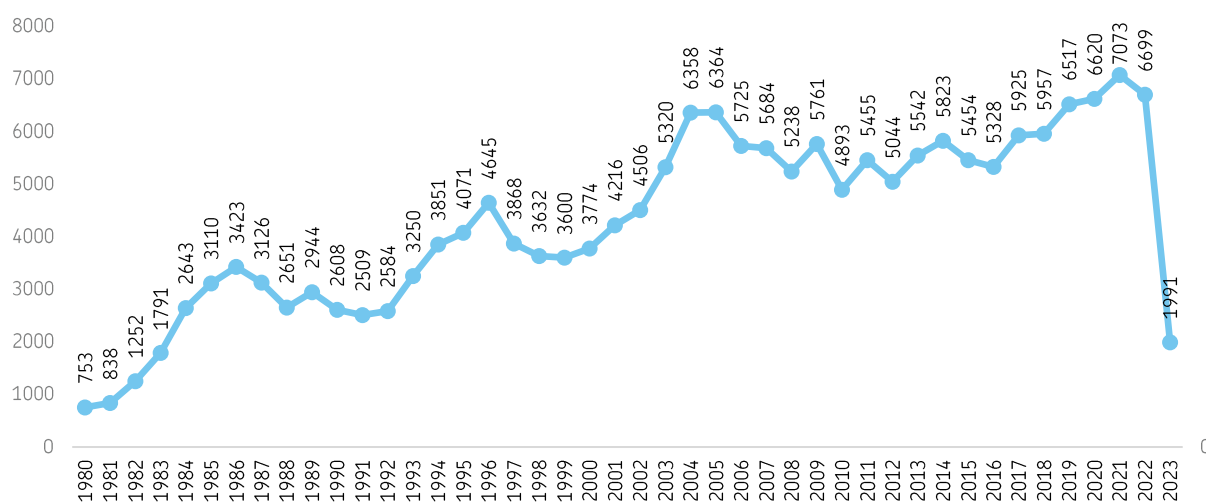
В течение 1980–2023 годов наблюдается положительная динамика роста количества публикаций научных работ в сфере цифрового проектирования и моделирования. Для поиска было использовано 2 запроса, содержащих аббревиатуры и/или полные названия классов программного обеспечения, а также исключения ряда словосочетаний, специфичных для таких отраслей как медицина: первый (Запрос №1) без ограничения по сферам применения по отраслям промышленности, второй (Запрос №2) – с данным ограничением¹⁰.

¹⁰ Запрос №1. Для поиска был использован следующий запрос: TITLE-ABS-KEY("computer-aided design" OR "CAD model*" OR "CAD system*" OR "CAD tool*" OR "CAD software" OR "computer-aided manufacturing" OR "CAM program*" OR "CAM system*" OR "CAM tool*" OR "CAM software" OR "computer-aided engineering" OR "CAE program*" OR "CAE system*" OR "CAE tool*" OR "CAE software" OR "product data management" OR "PDM system*" OR "PDM tool*" OR "PDM software" OR "product lifecycle management" OR "PLM system*" OR "PLM tool*" OR "PLM software" AND NOT "coronary artery disease" AND NOT "computer-aided diagnosis" AND NOT "computer-aided detection" AND NOT "crank angle degrees" AND NOT "cylindrical algebraic decomposition" AND PUBYEAR > 1979 AND PUBYEAR < 2024 AND PUBYEAR > 1979 AND PUBYEAR < 2024.

Запрос №2. Для поиска был использован следующий запрос: TITLE-ABS-KEY(((automotive* OR (aircraft* OR shipbuilding* OR boatbuilding* OR ((atomic* OR oil* OR gas* OR special* OR train*) W/9 engine W/2 building*) OR (mechanical W/2 engineering*) OR ((metallurgical* OR coke* OR petroleum* OR chemical*) W/2 production)))) AND ("computer-aided design" OR "CAD model*" OR "CAD system*" OR "CAD tool*" OR "CAD software" OR "computer-aided manufacturing" OR "CAM program*" OR "CAM system*" OR "CAM tool*" OR "CAM software" OR "computer-aided engineering" OR "CAE program*" OR "CAE system*" OR "CAE tool*" OR "CAE software" OR "product data management" OR "PDM system*" OR "PDM tool*" OR "PDM software" OR "product lifecycle management" OR "PLM system*" OR "PLM tool*" OR "PLM software" AND NOT "coronary artery disease" AND NOT "computer-aided diagnosis" AND NOT "computer-aided detection" AND NOT "crank angle degrees" AND NOT "cylindrical algebraic decomposition") AND PUBYEAR > 1979 AND PUBYEAR < 2024 AND PUBYEAR > 1979 AND PUBYEAR < 2024.

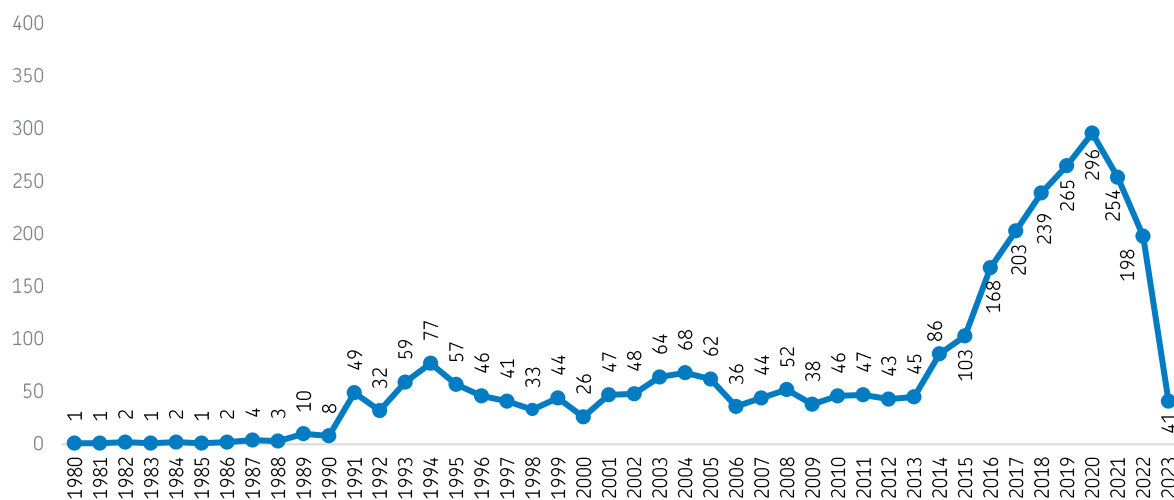
Согласно Запросу №1 (без ограничения по сферам применения по отраслям промышленности), за 1980–2023 годы в базе Scopus было зарегистрировано около 188,4 тыс. статей и других материалов по данной тематике. Динамика публикационной активности по России отличается от мировой. До 2022 года включительно динамика публикационной активности по миру демонстрировала постепенный и плавный рост, а среднегодовой темп прироста количества публикаций по миру за 2013–2022 годы составил 2,1%. Научный интерес к теме цифрового проектирования и моделирования в России оставался сравнительно низким до 2014 года, после чего темпы прироста количества публикаций по России резко возросли, что может быть связано с появлением государственных программ поддержки научно-технологической деятельности университетов.

Рисунок 25. Количество научных публикаций в мире сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

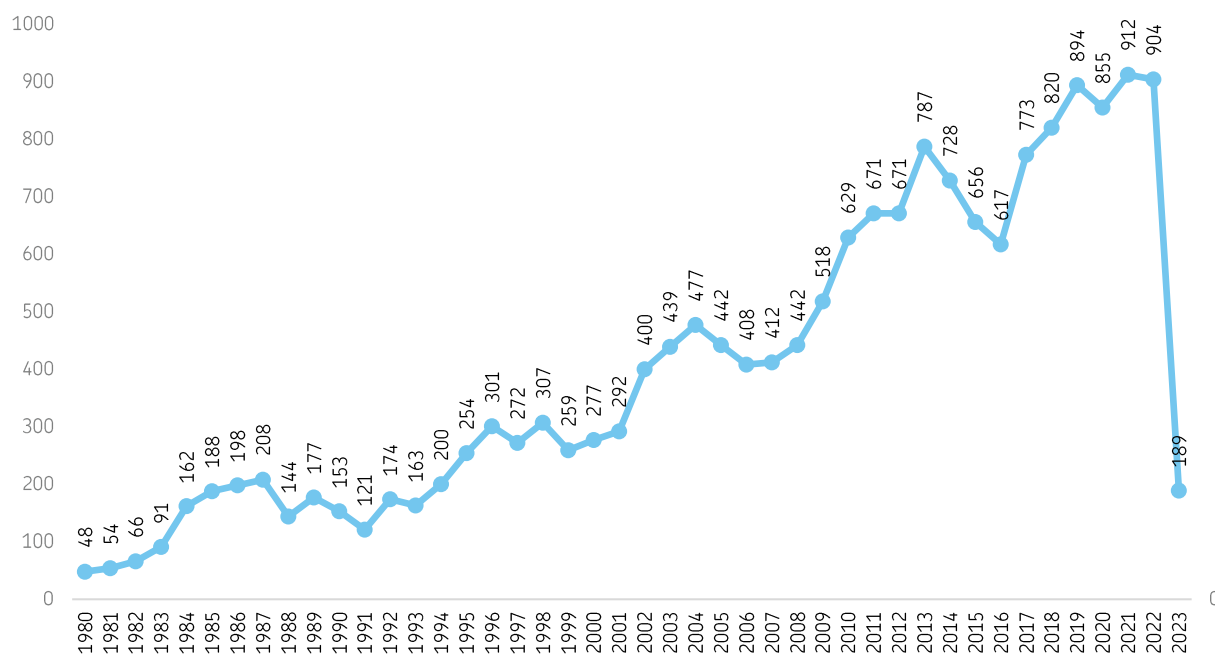
Рисунок 26. Количество научных публикаций в России в сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

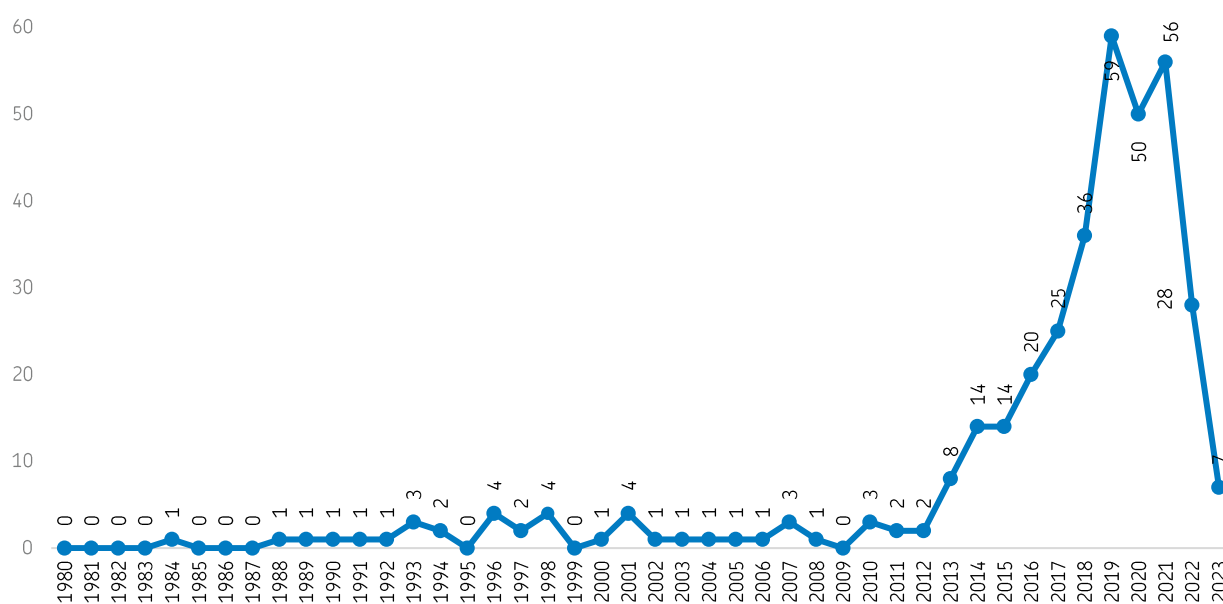
Согласно Запросу №2 (с ограничением по отраслям), за 1980–2023 годы в базе Scopus было зарегистрировано около 15,6 тыс. документов по данной тематике. Динамика публикационной активности по Запросу №1 и Запросу №2 является в целом схожей.

Рисунок 27. Количество научных публикаций в мире в сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №2 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

Рисунок 28. Количество научных публикаций в России в сфере цифрового проектирования и моделирования по годам согласно Запросу №2 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

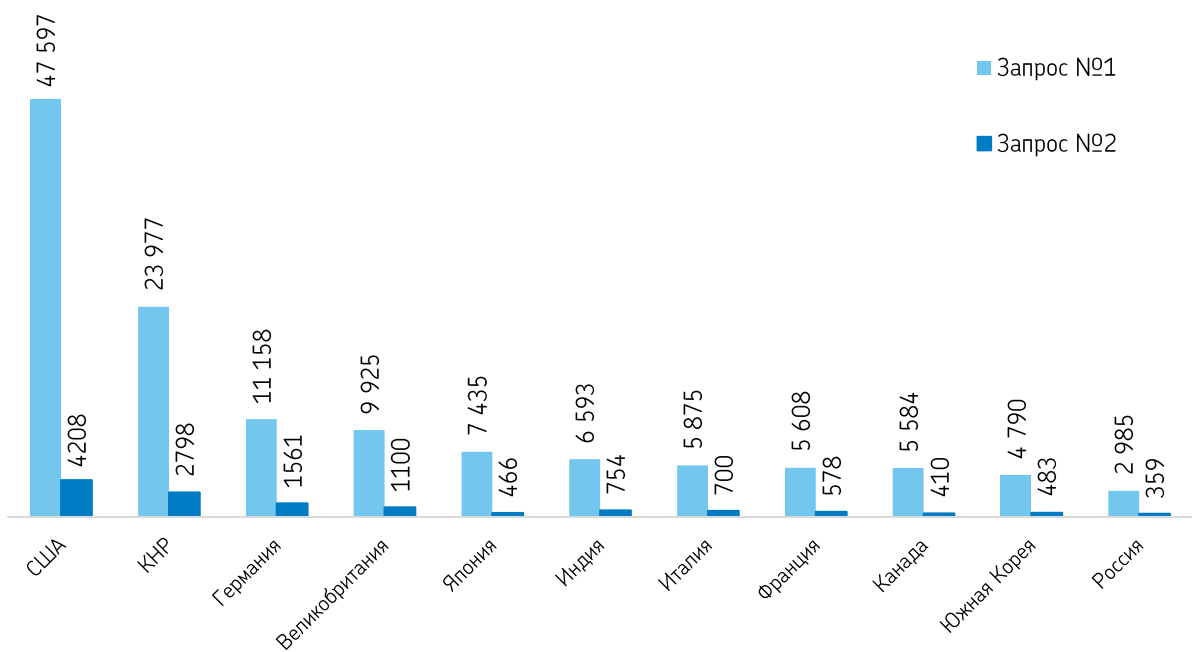
Таблица 10. Сравнение Запросов №1 и №2 по темпу прироста количества публикаций и наибольшему количеству публикаций в год (2013–2022 годы)

Область поиска	Темп прироста количества публикаций за 2013–2022 годы (%)	Наибольшее количество публикаций в год	Год, в который было опубликовано наибольшее количество публикаций	Среднее количество публикаций в год
Запрос №1				
По миру	2,1	7073	2021	4282
По России	17,9	296	2020	68
Запрос №2				
По миру	1,6	912	2021	403
По России	14,9	59	2019	8

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

Лидирующие позиции по количеству публикаций занимают США, КНР, Германия и Великобритания. В Российской Федерации, согласно базе данных Scopus, за 1980–2023 годы было опубликовано 2985 и 359 публикаций по Запросам №1 (без ограничения по отраслям) и №2 (с ограничениями по отраслям) соответственно.

Рисунок 29. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по странам по двум запросам (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

Публикация считается отнесенной к организации в том случае, если автор или соавтор публикации являлся участником ее составления и указал данные соответствующей организации.

Согласно Запросу №1 (без ограничения по отраслям) топ-10 аффилированных организаций расположены на территории КНР (3 организации) и США (7 организаций). Согласно Запросу №2 (с ограничением по отраслям) топ-3 аффилированных организаций расположены на территории КНР и США. В топ-10 организаций аффилиации вошли научно-исследовательские организации КНР (4 организации) и США (2 организации), 2 американские промышленные компании и 2 европейских университета (Германия и Италия). При изменении и сужении области поиска публикаций по отраслям изменяется перечень организаций аффилиации: в организациях аффилиации появляются промышленные компании, а также европейские университеты.

Рисунок 30. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в мире согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

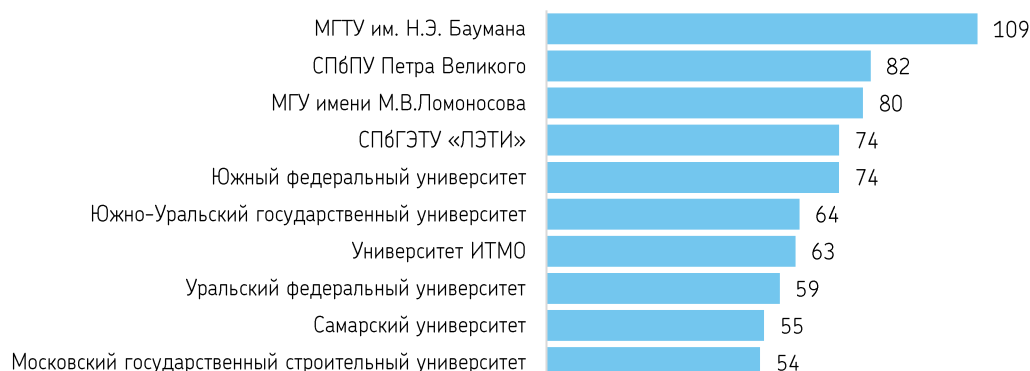
Рисунок 31. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в мире согласно Запросу №2 (6) (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

Согласно Запросу №1 (без ограничения по отраслям) в топ-3 аффилированных организаций по России вошли одни из ведущих научно-образовательных университетов страны: МГТУ им. Баумана, СПбПУ Петра Великого, МГУ им. М.В. Ломоносова. Согласно Запросу №2 (с ограничением по отраслям) в топ-3 аффилированных организаций по России вошли технические университеты, специализирующиеся на узконаправленных и наукоемких отраслях науки и промышленности (Самарский университет, МАИ, КНИТУ-КАИ). Так, при сужении области поиска публикаций по отраслям в топ-10 организаций аффилиации увеличивается количество организаций, чья деятельность связана с определенной отраслью прикладных технических наук.

Рисунок 32. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в России согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

Рисунок 33. Количество научных публикаций в сфере цифрового проектирования и моделирования по аффилированной организации в России согласно Запросу №1 (1980–2023 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

За последние 5 лет¹¹ (2019–2023 годы) одними из наиболее цитируемых работ по миру стали следующие статьи:

- An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. Ministry of Higher Education, Malaysia. 2019, 552 цитирования на момент проведения исследования [389];
- Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing. Martin A.A., Calt N.P., Khairallah S.A., Wang J. Lawrence Livermore National Laboratory. 2019, 309 цитирований на момент проведения исследования [390];

¹¹ На запросы №1 и №2 было наложено дополнительное ограничение, были проанализированы публикации за 2018–2022 годы.

- Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. Plocher, J., Panesar, A. 2019, 303 цитирования на момент проведения исследования [391].

За последние 5 лет (2019–2023 годы) одними из наиболее цитируемых работ по России стали следующие статьи:

- Improving the efficiency of automated precision robotics-enabled positioning and welding. Efimov A.Y., Gorkavyu M.A., Gorkavyu A.I., Solovov D.B. Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019, 17 цитирований на момент проведения исследования [392];
- Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology. Fedulov B., Fedorenko A., Khaziev A., Antonov F. МГУ им. М.В.Ломоносова, 2021, 16 цитирований на момент проведения исследования [393];
- Hardware factors influencing strength of parts obtained by fused filament fabrication. Kuznetsov V.E., Tavitov A.G., Urzhumtsev O.D., Mikhlin M.V., Moiseev A.I. Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, 2019, 16 цитирований на момент проведения исследования [394].

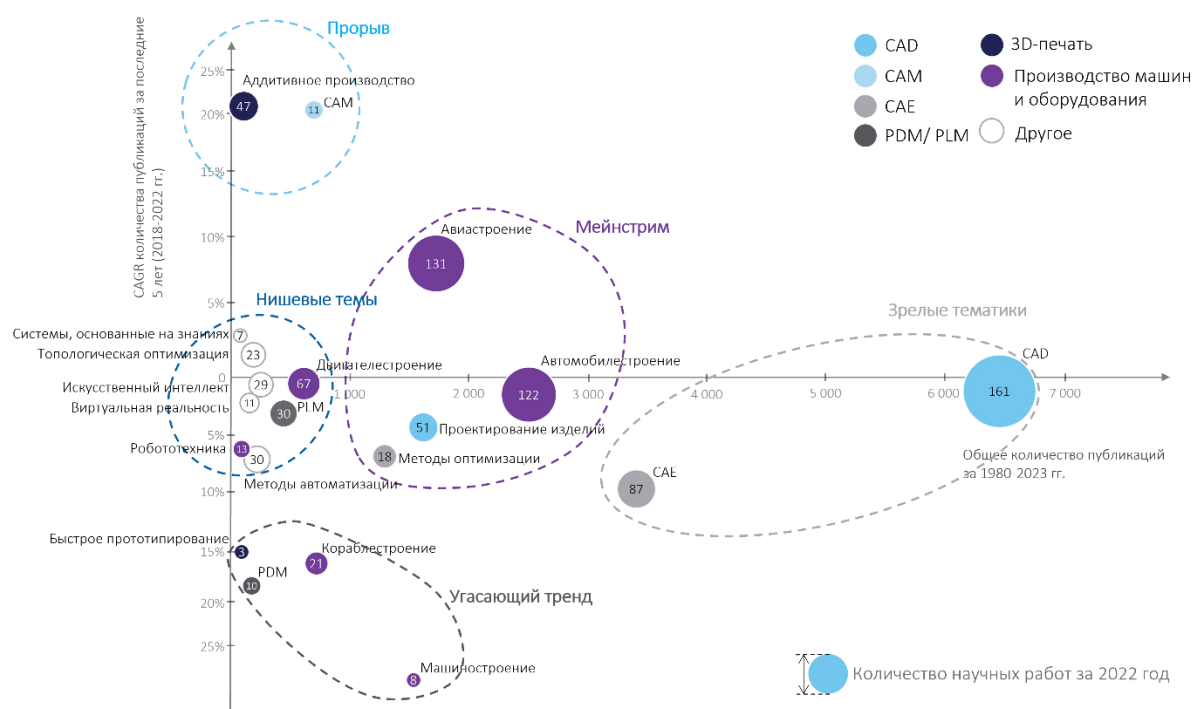
Ниже представлены результаты анализа направлений исследовательских работ в научной среде цифрового проектирования и моделирования в разрезе общих объемов публикаций за 1980–2022 годы и публикационной активности за 2018–2022 годы. Тематики были сформированы на основе анализа по ключевым словам. В рамках библиометрического анализа в области цифрового проектирования и моделирования были выявлены следующие направления публикаций: CAD, CAM, CAE, PDM/ PLM, 3D-печать, производство машин и оборудования.

При этом к CAD относятся публикации, раскрывающие разработку и использование ПО на базе CAD-систем, а также проектирование изделий. К CAE относятся методы оптимизации, а также разработка и использование ПО на базе CAE-систем, к PDM/ PLM – разработка и использование ПО на базе PDM-систем и PLM-систем. В рамках технологий создания трехмерных моделей (3D-печати) были отдельно выделены аддитивное производство и быстрое прототипирование. К направлению производства машин и оборудования были отнесены публикации, раскрывающие возможности использования ПО цифрового проектирования и моделирования в сфере авиастроения, автомобилестроения, двигателестроения, кораблестроения и машиностроения, а также робототехники.

К прочим тематикам («Другое») отнесены публикации, посвященные таким направлениям, как:

- разработка систем, основанных на знаниях;
- топология и топологическая оптимизация;
- применение технологий искусственного интеллекта в цифровом проектировании и моделировании;
- применение технологий виртуальной реальности в цифровом проектировании и моделировании;
- методы автоматизации.

Рисунок 34. Результаты анализа направлений исследовательских работ в научной среде цифрового проектирования и моделирования



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных библиографической базы данных Scopus, 2023

Для визуализации результатов анализа было выбрано следующее представление:

- ось ОУ отображает среднегодовой темп прироста количества (CAGR) публикаций исследовательских работ за последние 5 лет (период 2018–2022 годов)¹²;
- ось ОХ отображает общее количество публикаций исследовательских работ за 1980–2023 годы;
- размер пунсона отображает количество публикаций исследовательских работ за последний год, по которому есть полные данные о публикационной активности (2022 год).

Для определения наиболее перспективных трендов было проведено сегментирование публикаций по ключевым словам. Данные сегменты впоследствии были включены в следующие группы:

- «Зрелые тематики» – сложившиеся, традиционные направления, характеризующиеся жесткой организационной структурой и снижением (или стабильностью) вкладываемых ресурсов, зрелые научные направления характеризуются значительным накопленным количеством публикаций и слабым приростом или снижением числа публикаций в краткосрочном периоде.
- «Мейнстрим» – активно развивающиеся направления с оформленной

¹² Пятилетний период был выбран ввиду релевантности и актуальности изучаемых данных, что позволяет выявить наиболее актуальные и репрезентативные технологические тенденции.

организационной структурой, объемы привлекаемых ресурсов, которые продолжают расти. Научные направления, относящиеся к мейнстриму, также характеризуются большим накопленным количеством публикаций, в краткосрочном периоде продолжающим достаточно активно расти.

- «Прорыв» – новые, формирующиеся направления без четкой структурной организации, при этом привлекающие растущие объемы ресурсов. В прорывных научных направлениях накопленная научная база невелика, однако, публикации по таким темам растут быстрыми темпами.
- «Нишевые темы» – «зона узкой специализации» и «зона неопределенности», область теорий и до конца не оформленных концептов без устойчивой финансовой и организационной основы, которые могут как стать, так и не стать прорывными. В науке данная область отражена в статьях небольшого количества профильных журналов, динамика публикаций, при этом, нестабильна, как в краткосрочном, так и в долгосрочном периоде.
- «Угасающий тренд» – направления, некогда демонстрирующие положительные темпы прироста публикаций, однако на текущий момент теряющие популярность в исследовательских кругах. Такие области науки и знаний изучены исследователями на достаточном уровне и имеют слабо выраженные перспективы развития в краткосрочном периоде.

К «Зрелым тематикам» относятся публикации в области разработки и применения ПО на основе CAD и CAE в различных отраслях. Это связано с тем, что темпы прироста количества научных работ в разрезе данных тем достаточно невысокие, но общее количество научных работ по ним является наибольшим. Количество публикаций по данным тематикам в период 2018–2022 годов сокращалось, при этом общее количество существующих публикаций превышает общий объем публикаций по другим направлениям анализа. Подобная динамика может говорить о снижении интереса к данным направлениям, а также зрелости научных исследований и технологических решений на рынке.

К «Мейнстриму» относятся направления проектирования изделий, методов оптимизации, а также применения ПО для цифрового проектирования и моделирования в сфере авиастроения и автомобилестроения. Несмотря на то, что в разрезе некоторых тематик публикационная активность снижалась в последние годы, они характеризуются значительным общим объемом публикаций. Темпы прироста количества научных работ находятся на невысоком уровне, общее количество научных работ относительно высокое, но ниже, чем у «Зрелых тематик». Одной из наиболее популярных тематик публикаций является авиастроение: всего за 2022 год было опубликовано более 130 работ по данному направлению, а темп прироста количества публикаций по данной тематике за 2018–2022 годы составил 7,5%.

К «Прорыву» относятся аддитивное производство¹³ и разработка и применение САМ-систем в различных отраслях промышленности. Сравнительно низкий общий объем работ и высокие ежегодные

¹³ В данном анализе под аддитивным производством понимается комплекс производственных процессов, обеспечиваемых коммуникациями и локальными технологиями 3D-печати, реализуемых с использованием инновационных материалов.

темпы прироста публикаций свидетельствуют о растущем интересе научного сообщества к данным направлениям и последующем развитии в разрезе отдельных технологических решений на рынке.

«Нишевыми темами» являются публикации о разработке систем, основанных на знаниях, применении ПО для цифрового проектирования и моделирования в сфере двигателестроения и робототехники, разработке и применении PLM-систем, а также о методах топологической оптимизации, искусственного интеллекта, виртуальной реальности и автоматизации в сфере цифрового проектирования и моделирования. Количество опубликованных исследований по данным направлениям низкое или среднее, а прирост количества научных работ либо низкий, либо отрицательный. Сравнительно низкий объем публикаций и ежегодное снижение публикационной активности свидетельствует об интересе ограниченного числа исследователей к данным тематикам.

«Угасающим трендом» характеризуются тематики быстрого прототипирования¹⁴, разработки и применения PDM-систем, применения ПО для цифрового проектирования и моделирования в сфере кораблестроения и машиностроения. Количество публикаций по данным тематикам оценивается как низкое, темпы прироста количества научных работ по ним отрицательные (от -15% до -28%). Это может свидетельствовать о сравнительно низком уровне интереса научного сообщества к данным тематикам.

4.2.2. Результаты патентного анализа

С целью создания перспективных решений в сфере цифрового проектирования и моделирования, а также получения исключительных прав на инновационные разработки, отечественные и зарубежные компании реализуют по данной тематике НИОКР, результатом которых могут быть патенты¹⁵. Анализ патентной активности в области цифрового проектирования и моделирования был проведен на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit и Google Patents. Были рассмотрены патенты в разрезе технологий компьютерного проектирования (CAD), технологической подготовки и производства (CAM), компьютерного инжиниринга (CAE) и суперкомпьютерного инжиниринга (HPC), управления данными о продукте (PDM), управления жизненным циклом изделий (PLM).

Патентный анализ был реализован в двух фокусах с целью формирования наиболее полного и релевантного обзора патентной активности в сфере цифрового проектирования и моделирования. Были проведены:

- общий анализ патентной активности без привязки к конкретным отраслевым компаниям-разработчикам;

¹⁴ В данном анализе под быстрым прототипированием понимается технология быстрого «макетирования» или создания опытных образцов/ работающей модели системы с помощью технологий 3D-печати.

¹⁵ Понятия «патент» и «патентное семейство» в рамках данного исследования тождественны: патентом является документ о регистрации интеллектуальной собственности в патентном ведомстве определенной страны, а патентное семейство является набором одних и тех же патентов в патентных ведомствах разных стран. Патентный анализ всегда проводится в рамках патентных семейств, чтобы исключить повторный учет регистрации одного и того же изобретения, однако понятие «патент» может применяться с целью обозначения первого зарегистрированного патента в рамках патентного семейства.

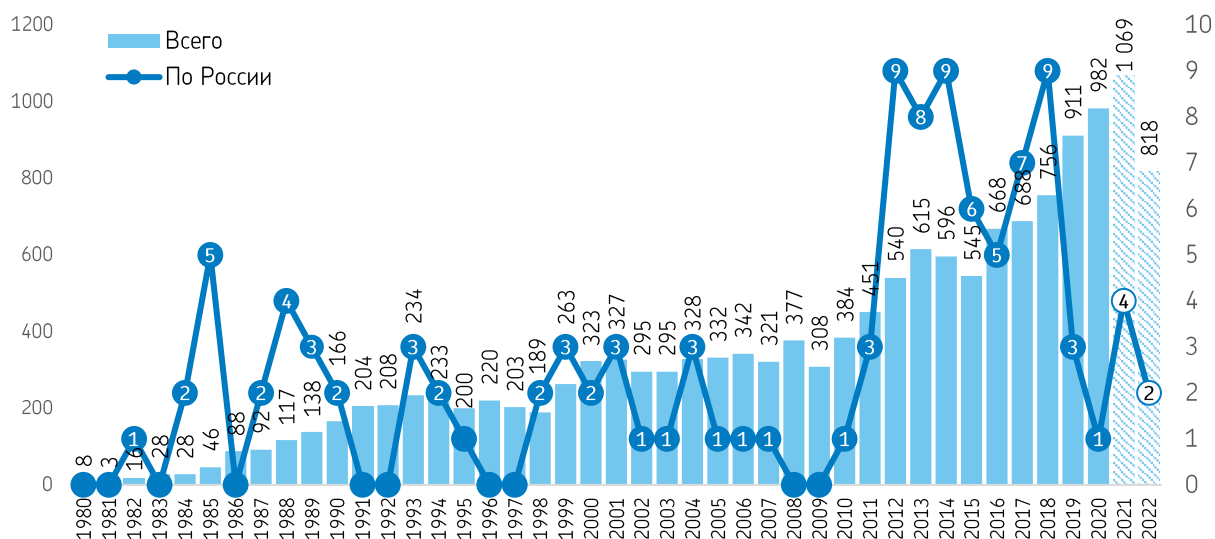
- анализ патентной активности конкретных компаний-разработчиков ПО цифрового проектирования и моделирования.

Данные виды анализа отличаются запросами поиска: в первом запросе анализируется вся сфера цифрового проектирования и моделирования с ограничениями по искомой предметной области, во втором запросе – патентная активность отдельных компаний-разработчиков ПО цифрового проектирования и моделирования, присутствующих на мировом рынке.

Общий анализ патентной активности без привязки к конкретным отраслевым компаниям-разработчикам

Общий патентный анализ по технологиям CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM и PLM по миру и по России (с учетом данных по СССР) был проведен за 1980–2022 годы, так как активное развитие технологий началось в 1980-х годах, и данные по этому временному промежутку наиболее актуальны в разрезе анализа мирового и российского рынков. В рамках данной предметной области в течение 1980–2022 годов, согласно информации из международной патентной базы данных Questel Orbit, было подано 14955 заявок на получение патента. Из них большая часть была получена патентными ведомствами КНР, США и Японии, а также Европейским патентным ведомством (далее – ЕПВ) и Всемирной организацией интеллектуальной собственности (далее – ВОИС). В России за 1980–2022 годы было зарегистрировано 110 заявок на получение патента в сфере технологий CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM.

Рисунок 35. Количество поданных заявок на получение патента в сфере CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM по годам (1980–2022 годы)

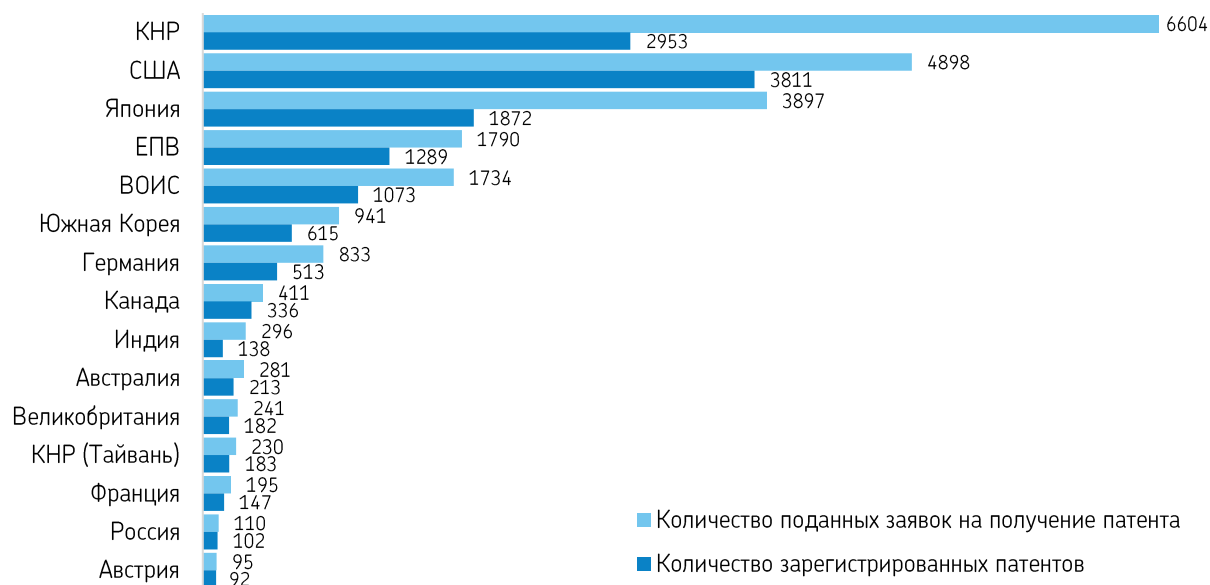


Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, 2023¹⁶.

¹⁶ Для поиска был использован следующий запрос: (((COMPUTER_AIDED DESIGN) OR (CAD 1D MODEL+) OR (CAD 1D SYSTEM+) OR (COMPUTER_AIDED MANUFACTURING) OR (CAM 1D MODEL+) OR (CAM 1D SYSTEM+) OR

Большая часть зарегистрированных (полученных) патентов приходится на КНР, США и Японию. По количеству полученных патентов Россия занимает 14 место: в российском патентном агентстве – Федеральной службе по интеллектуальной собственности (далее – ФИПС) – за 1980–2022 годы было зарегистрировано 102 патента.

Рисунок 36. Количество патентов в сфере CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM по патентным агентствам стран (1980–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, 2023

Согласно анализу количества поданных заявок на получение патента и количества публикаций (получения) патентов в мире, в течение 1980–2022 годов наблюдается в целом положительная динамика количества заявок на получения патента в сфере технологий CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM, за исключением спада количества заявок на получение патента после 2021 года в мире, и после 2018 года – в России. При этом снижение значений показателей может быть связано

(COMPUTER_AIDED ENGINEERING) OR (CAE 1D MODEL+) OR (CAE 1D SYSTEM+) OR (HIGH_PERFORMANCE COMPUTING) OR ((HPC OR HIGH_PERFORMANCE COMPUTING) AND (COMPUTER_AIDED ENGINEERING OR CAE)) OR (PRODUCT 1D DATA 1D MANAGEMENT) OR (PDM 1D MODEL+) OR (PDM 1D SYSTEM+) OR (PRODUCT 1D LIFECYCLE 1D MANAGEMENT) OR (PLM 1D MODEL) OR (PLM 1D SYSTEM+) NOT (SECTION OR GROOVE OR DISEASE OR TREATMENT OR DISORDER OR DRUG OR CAMERA OR PHOTO+ OR DYE OR FILM OR DENTURE OR MEDICAL OR AUDIO))/TI/AB/OBJ/KEYW AND ((G06F OR G06T OR G06Q OR G05Q OR H04L OR G06N OR G06K OR G01B OR G01N OR H01L OR B22F OR H05K OR G01R OR G06G OR G01M OR B23K OR B25J OR G06V OR B23Q OR G01C OR G09G OR B21D OR B23P OR B22C OR G01S OR H04N OR G03F OR E04G OR E04B OR G11C OR H04B OR B62D OR B63B OR G02B OR B64F OR B01D OR C22C)/IPC AND ("basic materials chemistry" or "materials, metallurgy" or "micro-structure and nano-technology" or "organic fine chemistry" or "surface technology, coating" or "macromolecular chemistry, polymers" or "chemical engineering" or "audio-visual technology" or "basic communication processes" or "control" or "measurement" or "optics" or "digital communication" or "computer technology" or "electrical machinery, apparatus, energy" or "semiconductors" or "it methods for management" or "telecommunications" or "engines, pumps, turbines" or "handling" or "machine tools" or "mechanical elements" or "other special machines" or "thermal processes and apparatus" or "transport")/TECT) AND APD=1980-01-01:2022-12-31.

с тем, что патентные документы публикуются национальными и региональными патентными ведомствами через 18 месяцев после того, как патентная заявка была впервые опубликована. Среднегодовой темп прироста по количеству заявок на патенты в мире в период с 2011 по 2020 год составил 9,0% (2021 и 2022 годы не учитывались в расчете). При этом количество публикаций (получения) патентов в этой сфере стабильно возрастает на протяжении всего рассматриваемого промежутка времени.

Рисунок 37. Динамика количества заявок на получение патента по миру (1980–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, 2023

В России наблюдалась нестабильная динамика количества заявок на получение патента по рассматриваемым технологиям (CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM, PLM) в течение 1980–2022 годов. Наибольшее количество патентов было зарегистрировано в 2019 и 2020 годах – 12 и 13 патентов соответственно.

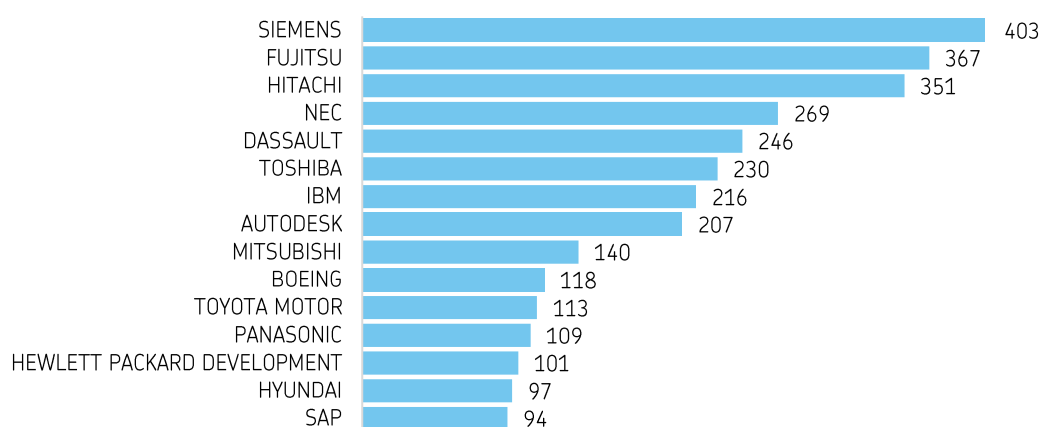
Рисунок 38. Динамика количества заявок на выдачу патентов по России (1980–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, 2023

Среди компаний-лидеров по количеству патентов в области технологий цифрового проектирования и моделирования в мире за период 1980–2022 годов стали: Siemens (Германия), Fujitsu (Япония), Hitachi (Япония). Siemens патентует собственные методы в сфере цифрового проектирования и моделирования, среди которых: способы и методы исследования изделия с использованием динамической среды и физического моделирования, генерации расчетных сеток, автоматизации создания рабочих планов для производства множества изделий и многие другие. Fujitsu патентует решения, связанные с модификацией исходного кода и сравнением результатов для высокопроизводительных вычислений и т. д. Среди патентов Hitachi есть решения для поддержки создания трехмерных моделей изделия, системы обработки информации и управления жизненным циклом изделий.

Рисунок 39. Количество зарегистрированных патентов по компаниям по миру (1980–2022 годы)

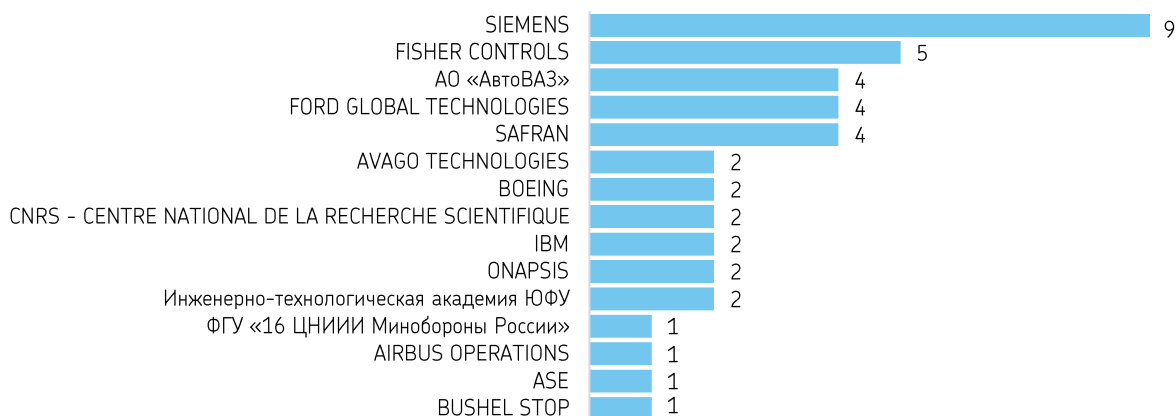


Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, 2023

Коммерческими компаниями-лидерами по количеству патентов в рассматриваемой на территории России за период 1980–2022 годов стали: Siemens (Германия), Fisher Controls (США), АО «АвтоВАЗ» (Россия). В России Siemens зарегистрировал патенты в сфере PLM, CAD и проч. Зарегистрированные в России патенты Fisher Controls связаны с использованием технологий в определенных производственных процессах: например, производство клапанов и присоединение фланцев к их торцам корпуса с использованием алгоритмов прогнозирования сварочной деформации или изготовления корпуса клапана, имеющего одну или более коррозионностойких внутренних поверхностей на базе технологий CAD, CAM и CAE.

АО «АвтоВАЗ» патентует решения на основе CAD- и CAE-систем для построения диаграмм предельных деформаций листового материала, для оценки состояния процесса производства деталей, а также для согласования блоков данных о событиях с их временными значениями с целью повышения качества осуществления контроля за выполнением работ и снижения трудоемкости редактирования данных при автоматизированном проектировании изделий. Другие отечественные патентообладатели, среди которых научно-исследовательские институты и производственные компании, также предлагают различные решения в области вычислительной техники, предназначенные для автоматизированного проектирования и моделирования. Среди них – устройство для оценки линейного размещения элементов, устройство для выбора оптимальных решений, способы адаптивной обработки изделий на станках с ЧПУ и т. д.

Рисунок 40. Количество зарегистрированных патентов по компаниям по России (1980–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, 2023

Наиболее релевантные патенты¹⁷, признанные патентными агентствами зарубежных стран, международными патентными агентствами и российским патентным агентством, связаны с использованием CAE-технологий для определения оптимальных условий для производства и эксплуатации изделий, с быстрой адаптацией CAD-моделей различных изделий, в том числе электромеханических, а также с лазерными аддитивными технологиями. Это объясняется высокой потребностью в производстве высокотехнологичных изделий, и, соответственно, наличием строгих требований к точности проектирования и моделирования, а также к устойчивости готового изделия к различным нагрузкам.

Также наблюдается высокий уровень релевантности у патентов, связанных с технологиями использования облачных вычислений в системах компьютерного инжиниринга, технологиями управления жизненным циклом изделий и технологиями управления изменениями данных об изделии. Это обусловлено мировым трендом на повышение качества контроля информации на всех этапах жизненного цикла изделия, а также увеличением количества данных, требующих обработки с применением сложных вычислений.

Анализ патентной активности компаний-разработчиков программного обеспечения цифрового проектирования и моделирования

В рамках исследования был проведен анализ патентной активности зарубежных компаний-лидеров рынка технологий цифрового проектирования и моделирования. Для анализа использовались системы Questel Orbit и Google Patents. Были проанализированы: динамика получения патентов компаниями-разработчиками ПО за период 1980–2022 годов и количество полученных патентов за период 2018–2022 годов.

¹⁷ Наиболее релевантные патенты отобраны внутренними инструментами Questel Orbit по комплексному показателю или «силе патента», формируемому на основе ряда индикаторов, таких как срок действия патента, географический охват семейства, цитируемость патента, наличие лицензий или споров по документам семейства, объем прав и проч.

Результаты анализа патентов компаний сгруппированы в соответствии с технологиями цифрового проектирования и моделирования: компьютерное проектирование (CAD), технологическая подготовка производства (CAM), компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг (CAE, HPC), технологии управления данными о продукте (PDM) и технологии управления жизненным циклом изделий (PLM), а также приведены патенты, которые возможно отнести к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования. Для поиска были установлены ограничения не только по отобранным компаниям, но и по сфере патентирования (Computer technology, IT methods for management, Electrical machinery, apparatus, energy). Полученные результаты были проанализированы за период 1980–2022 годов и 2018–2022 годов. Кроме того, у наиболее релевантных патентов¹⁸ были выявлены основные коды международной патентной классификации (далее – МПК), их расшифровка представлена в Приложении 6.

Стоит отметить, что проведение аналогичного патентного исследования в разрезе отечественных компаний-разработчиков систем цифрового проектирования и моделирования не является целесообразным, так как согласно статье 1350 Гражданского кодекса РФ, программы для ЭВМ не являются изобретениями и не могут быть запатентованы. Ввиду этого отечественные компании-разработчики в большей степени заинтересованы в регистрации программ ЭВМ в рамках авторского права. Анализ результатов интеллектуальной деятельности (РИД) некоторых отечественных компаний-разработчиков представлен в главе 5 настоящей работы.

Патенты, относящиеся к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования (CAD, CAE/ HPC, CAM, PDM/ PLM)

Далее представлен общий анализ патентов компаний-лидеров рынка, которые возможно отнести к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования. В общей сложности данными компаниями на момент проведения исследования было получено 1226 патентов. Данный анализ включал в себя исследование патентной активности Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens (Германия), PTC (США), ANSYS (США), Altair Engineering (США), ZWSOFT (КНР).

Таблица 11. Количество патентов компаний, которые возможно отнести к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования

Компания	Коды МПК19	Общее количество патентов20	Количество патентов за 2018–2022 годы
Dassault Systèmes	G06F-017, G06F-030	458	97
Siemens	G06F-017	384	37
Autodesk	G06F-030	253	71

¹⁸ Там же.

¹⁹ Коды МПК трех портфелей патентов с наибольшей общей суммой значений отдельных патентов внутреннего индекса Questel Orbit «сила патента».

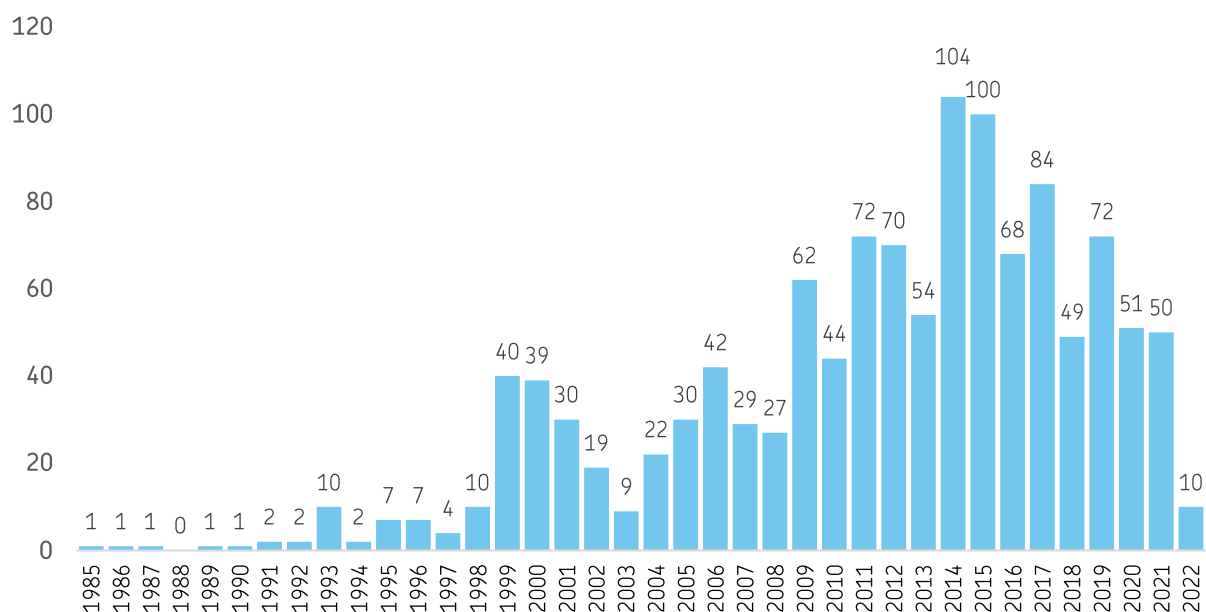
²⁰ Данная информация не отражает общее количество патентов компаний, в данном столбце прописано количество тех патентов, в которых явным образом указана связь с системами цифрового проектирования и моделирования.

Компания	Коды МПК19	Общее количество патентов20	Количество патентов за 2018–2022 годы
PTC	G06T-017, G06F-030	60	5
ANSYS	G06F-030, G06G-007	52	6
Altair Engineering	G06F-008, G06F-030, G06F-017	10	8
ZWSOft	G06F-030, G06F-003, G06F-017	9	8
Всего		1226	232

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Пик патентной активности пришелся на 2014 год: всего было получено компаниями 104 патента. После этого началось постепенное снижение патентной активности, несмотря на увеличения числа полученных патентов до 84 в 2017 году и до 72 в 2019 году. Наибольшее количество патентов за последние 5 лет было опубликовано Dassault Systèmes (97 патентов).

Рисунок 41. Динамика количества полученных компаниями патентов, которые возможно отнести к нескольким технологиям цифрового проектирования и моделирования (единиц, 1985–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Компьютерное проектирование (CAD)

Далее представлен общий анализ патентной активности компаний в области компьютерного проектирования (CAD). В общей сложности компаниями на момент проведения исследования было получено 876 патентов. Данный анализ включал в себя исследование патентной активности

Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens (Германия), PTC (США), ZWSoft (КНР), Empyrean Technology (КНР), GStarSoft (КНР)²¹.

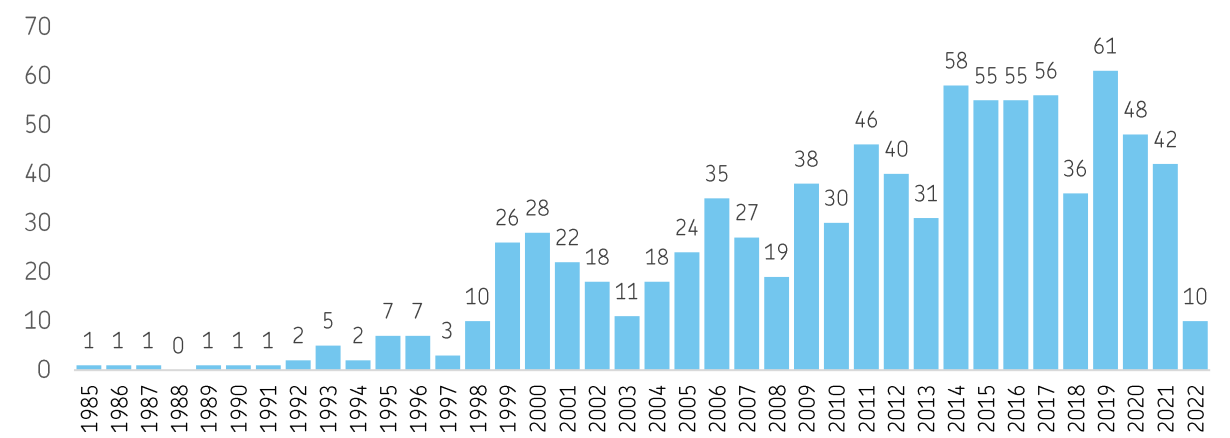
Таблица 12. Количество зарегистрированных компаниями патентов

Компания	Коды МПК	Общее количество патентов	Количество патентов за 2018–2022 годы
Dassault Systèmes	G06T-019, G06T-015, G06F-030	348	89
Autodesk	G06F-017, G06F-019	248	68
Siemens	G06F-030, G06F-017, G05B-019	182	25
PTC	G06F-017	56	5
Empyrean Technology	G06F-017, G06F-030, G06F-003	24	0
GStarSoft	G06F-030	14	7
ZWSoft	G06F-017, G06F-008, G06F-030	4	3
Всего		876	197

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Пик патентной активности пришелся на 2019 год: всего компаниями был получен 61 патент. При этом за 2014–2018 годы также наблюдается повышенный интерес компаний к патентированию, и среднее количество патентов, опубликованных за эти годы, равно 56. Наибольшее количество патентов за последние 5 лет было опубликовано Dassault Systèmes (89 патентов).

Рисунок 42. Динамика количества полученных компаниями патентов в области CAD (1985–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

²¹ Для поиска был использован следующий запрос: (COMPUTER_AIDED DESIGN) OR (CAD 1D MODEL+) OR (CAD 1D SYSTEM+).

Компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг (CAE, HPC)

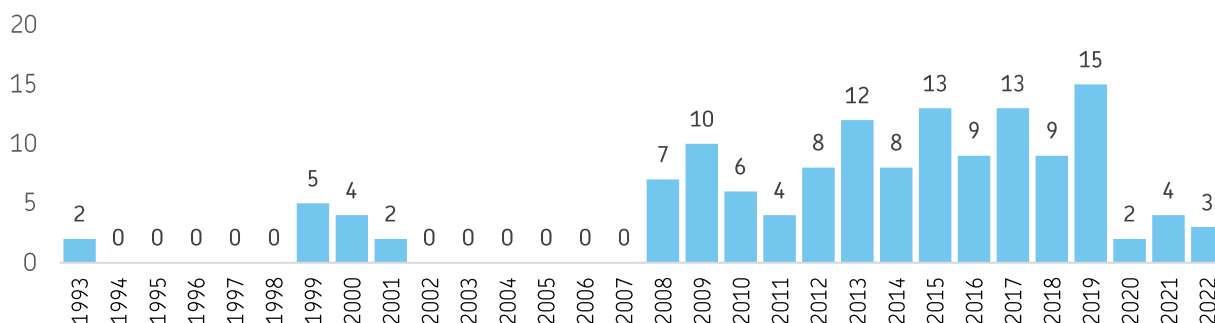
Анализ включал в себя исследование патентной активности Dassault Systèmes (Франция), Siemens (Германия), ANSYS (США), MSC Software (США), Magna Steyr (Австрия), NUMECA (Бельгия)²². В общей сложности данными компаниями на момент проведения исследования было получено 136 патентов.

Таблица 13. Количество зарегистрированных компаниями патентов

Компания	Коды МПК	Общее количество патентов	Количество патентов за 2018–2022 годы
ANSYS	G06F-017, G06F-007	52	6
Dassault Systèmes	G06F-017, G06T-019	38	5
MSC Software	G06F-017	19	15
Siemens	G06F-017, G06N-007, G06F-030	15	1
Magna Steyr	B60W-030, B22D-019, B29C-045	11	6
NUMECA	G06F-030	1	0
Всего		136	33

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Рисунок 43. Динамика количества полученных компаниями патентов в области CAE/ HPC (1980–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Пик патентной активности пришелся на 2019 год: всего компаниями было получено по 15 патентов. После этого началось резкое снижение патентной активности (за 2020–2022 годы всего компаниями было опубликовано по 9 патентов). Наибольшее количество патентов за последние 5 лет было опубликовано MSC Software (15 патентов).

²² Для поиска был использован следующий запрос: (COMPUTER_AIDED ENGINEERING) OR (CAE 1D MODEL+) OR (CAE 1D SYSTEM+) OR (HIGH_PERFORMANCE COMPUTING) OR ((HPC OR HIGH_PERFORMANCE COMPUTING) AND (COMPUTER_AIDED ENGINEERING OR CAE)).

Технологическая подготовка производства (CAM)

Данный анализ включал в себя исследование патентной активности Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens (Германия), ZWSoft (КНР)²³. В общей сложности данными компаниями на момент проведения исследования было получено 74 патента.

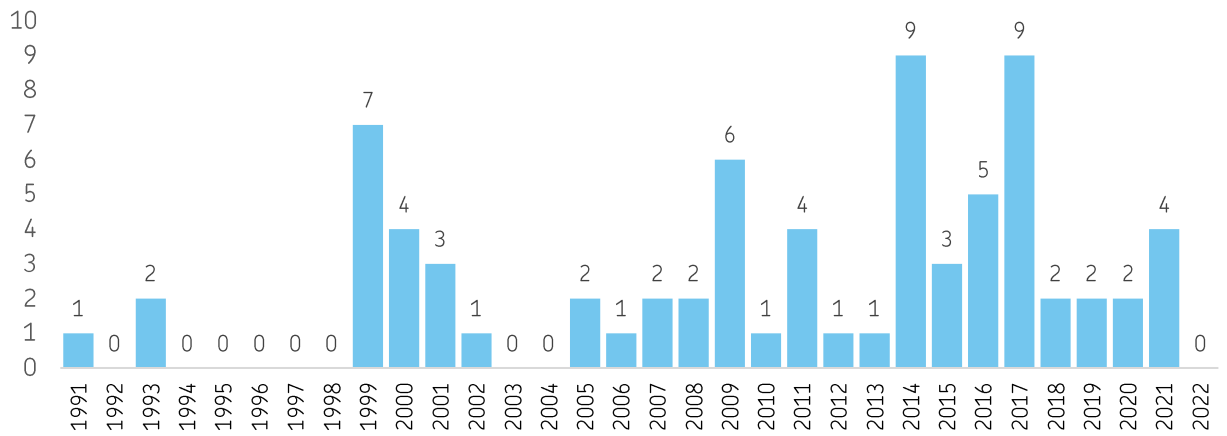
Таблица 14. Количество зарегистрированных компаниями патентов

Компания	Коды МПК	Общее количество патентов	Количество патентов за 2018–2022 годы
Dassault Systèmes	B25J-013, G06T-019, G06F-017	33	0
Siemens	G05B-019, G05B-017	31	2
Autodesk	G06F-030, G05B-019	5	3
ZWSoft	B23C-003, G05B-019	5	5
Всего		74	10

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Пик патентной активности пришелся на 2014 и 2017 годы: за эти годы компаниями было получено по 9 патентов. После этого началось резкое снижение патентной активности (за 2018–2020 годы всего компаниями было опубликовано по 2 патента). В 2021 году всего компаниями было получено 4 патента, при этом большее количество патентов, опубликованных за последние 5 лет, принадлежит ZWSoft (5 патентов).

Рисунок 44. Динамика количества полченных компаниями патентов в области CAM (1991–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

²³ Для поиска был использован следующий запрос: (COMPUTER_AIDED MANUFACTURING) OR (CAM 1D MODEL+) OR (CAM 1D SYSTEM+).

Управление данными об изделии (PDM) и управление жизненным циклом изделий (PLM)²⁴

Анализ включал в себя исследование патентной активности Siemens (Германия), Dassault Systèmes (Франция), Oracle (США), PTC (США)²⁵. В общей сложности данными компаниями на момент проведения исследования было получено 233 патента.

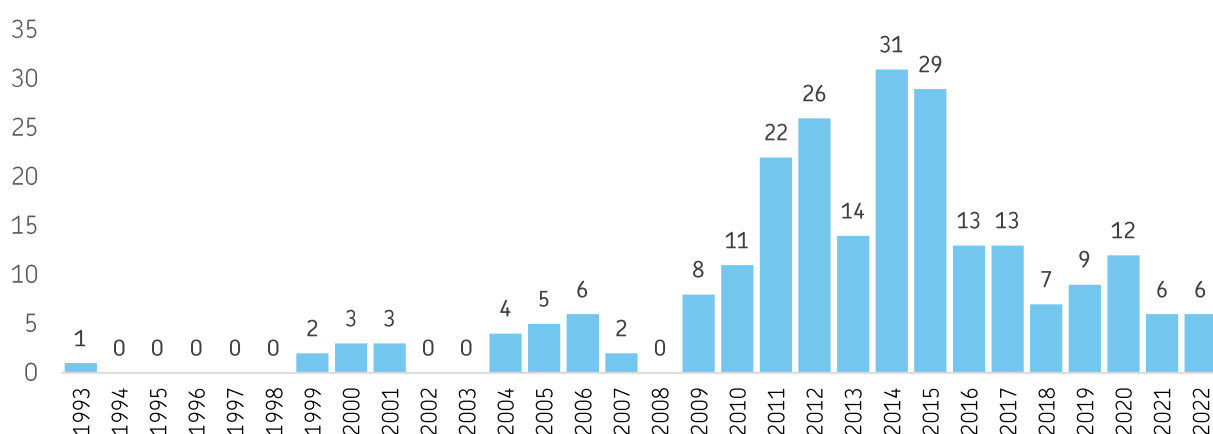
Таблица 15. Количество зарегистрированных компаниями патентов

Компания	Коды МПК	Общее количество патентов	Количество патентов за 2018–2022 годы
Siemens	G06F-030, G06F-017	156	9
Dassault Systèmes	G06F-016, G06F-003, G06F-017	39	3
Oracle	G06Q-030, G06F-015	34	28
PTC	G06T-015, G06F-017, G06Q-010	4	0
Всего		233	40

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

Пик патентной активности пришелся на 2014–2015 годы: всего компаниями было получено 31 и 29 патентов соответственно. После этого началось снижение патентной активности (за 2016–2022 годы в среднем всего компаниями публиковалось по 9 патентов в год). Наибольшее количество патентов за последние 5 лет было опубликовано Oracle (28 патентов).

Рисунок 45. Анализ временной динамики получения компаниями патентов, соответствующих PDM/ PLM (единиц, 1980–2022 годы)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных международной патентной базы данных Questel Orbit, Google Patents, 2023

²⁴ PDM и PLM рассматриваются совместно ввиду особенностей технологий и ограниченности выборки патентов.

²⁵ Для поиска был использован следующий запрос: (PRODUCT 1D DATA 1D MANAGEMENT) OR (PDM 1D MODEL+) OR (PDM 1D SYSTEM+) OR (PRODUCT 1D LIFECYCLE 1D MANAGEMENT) OR (PLM 1D MODEL) OR (PLM 1D SYSTEM+).

Резюме

Лидерами по количеству полученных патентов в области цифрового проектирования и моделирования являются компании Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция) и Siemens (Германия), а также компания ANSYS (США) в разрезе технологий компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга. За последние 5 лет (2018–2022 годы) наибольшее количество патентов было опубликовано Dassault Systèmes (97 патентов).

Наибольшее число патентов было получено рассмотренными компаниями-разработчиками в области технологий компьютерного проектирования (876 патентов). В области PDM и PLM было получено 233 патента, в области CAE и HPC – 136 патентов), в области CAM – 74 патента. Относительно небольшое количество патентов в области CAM-, CAE-, HPC-, PDM- и PLM-систем в том числе связано со сложностью их разработки и внедрения в производство, а также узкой направленностью отдельных систем. Также стоит отметить, что рассматриваемые компании могут преимущественно регистрировать программы для ЭВМ и базы данных, необходимые для разработки и функционирования систем компьютерного проектирования и моделирования, но не являющихся объектами патентного права [395].

4.3. Технологический радар рынка цифрового проектирования и моделирования

На основе аналитического обзора технологий цифрового проектирования и моделирования, библиометрического анализа был сформирован технологический радар технологий цифрового проектирования и моделирования.

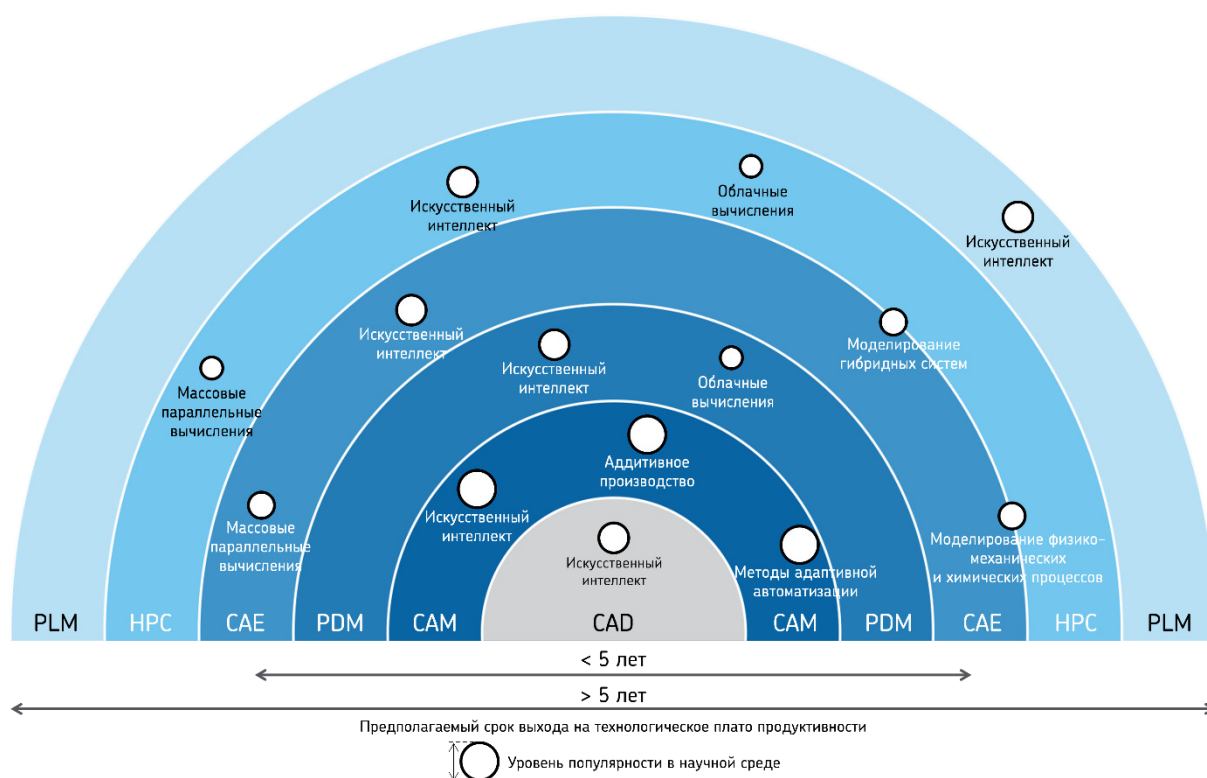
В целях визуализации результатов анализа было выбрано следующее представление:

- расположение типов систем цифрового проектирования на оси ОХ обусловлено различным уровнем представленности решений на рынке и научно-технологического развития: так, CAD-системы являются наиболее представленными на рынке и наиболее исследуемыми в научной среде, в то время как PLM-системы – наименее;
- расположение технологий («точек» роста) в рамках одного типа систем обусловлено различными сроками их выхода на технологическое плато продуктивности применительно как к типу систем, так и к глобальному уровню развития технологии в сфере систем цифрового проектирования и моделирования: так, прорыв в развитии технологий применения искусственного интеллекта в CAD-системах ожидается в ближайшие 5 лет, в то время как глобальная популяризация этой же технологии в разрезе PLM-систем ожидается не менее чем через 5 лет;
- размер пунсона отображает уровень популярности технологий в научной среде.

В рамках исследования для каждого типа систем были выделены «точки» роста с наибольшим потенциалом развития ввиду высокого спроса на их использование в производственных процессах. Для их определения были рассмотрены отечественные и зарубежные научные публикации, материалы конференций по инженерному ПО, заявления компаний-разработчиков о планах развития данных технологий. Таким образом, наиболее значимыми «точками» роста решений цифрового проектирования и моделирования являются:

- искусственный интеллект (для CAD-, CAM-, CAE/ HPC-, PDM- и PLM-систем);
- аддитивное производство (для CAM-систем);
- методы адаптивной автоматизации (для CAM-систем);
- облачные вычисления (для PDM- и HPC-систем);
- моделирование гибридных систем (на стыке CAE/ HPC-систем);
- моделирование физико-механических и химических процессов (на стыке CAE/ HPC-систем);
- массовые параллельные вычисления (для CAE/ HPC-систем).

Рисунок 46. Технологический радар технологий цифрового проектирования и моделирования



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова

CAD-системы достаточно широко представлены на рынке ПО, активно используются в отраслях промышленности для решения задач различного уровня сложности. «Точкой» роста CAD-систем является внедрение искусственного интеллекта (в частности – машинного обучения). Использование искусственного интеллекта может способствовать оптимизации процесса проектирования благодаря созданию проектных предложений на основе множества гетерогенных параметров [315]. Это позволит решать более сложные проектные задачи и удовлетворять спрос на трудоемкие для проектирования и производства изделия в различных отраслях промышленности.

CAM-системы также широко представлены на рынке. Рост числа предприятий, использующих станки с ЧПУ, служит драйвером для развития данного ПО. CAM-системы при этом развиваются в направлении большей автоматизации процессов, чему может способствовать внедрение искусственного интеллекта (технологии машинного обучения) для прогнозирования траекторий движения инструментов станков. Использование методов искусственного интеллекта в CAM-системах

также может способствовать созданию наиболее оптимальных программ ЧПУ благодаря появлению возможности внедрения модуля автоматизированного поиска наилучшей траектории движения инструмента и его положения [396]. Ключевой «точкой» роста данного типа программных систем является аддитивное производство: анализ публикационной активности ключевых игроков рынка, а также результаты библиометрического анализа подтверждают данную тенденцию развития САМ-систем.

PDM-системы реже внедряются компаниями для сбора и хранения данных о результатах проектирования и конструкторско-технологической подготовки производства или используются не в полном объеме. Развитию PDM-систем может способствовать внедрение технологий искусственного интеллекта, облачных вычислений и хранения данных: эти технологии позволят ускорить обработку данных, оптимизировать их анализ и прогнозирование, а также повысить интерес потенциальных потребителей к данным системам.

CAE-системы считаются достаточно распространенной технологией с большим потенциалом для дальнейшего развития. У CAE-систем выявлено наибольшее количество «точек» роста: развитие технологий моделирования физико-механических и химических процессов, развитие моделирования гибридных систем (на стыке CAE-/ HPC-систем), использование технологий искусственного интеллекта, облачных вычислений и хранения данных.

Так как PLM-системы являются комплексными системами, используемыми для управления всеми этапами жизненного цикла изделия, их уровень развития зависит от уровня развития CAD-, CAE, CAM- и PDM-систем. Стимулом для дальнейшего распространения PLM-систем может стать использование технологий искусственного интеллекта, что будет способствовать ускорению и оптимизации процессов интеграции и обработки данных из различных систем.

Современные методы хранения и обработки данных позволяют выявлять дефекты производства и выполнять прогностическую диагностику изделий с минимальным риском возникновения ошибок на протяжении всего его жизненного цикла. Комплексное использование технологий цифрового проектирования и моделирования и других цифровых технологий будет способствовать дальнейшему развитию рассматриваемой области, снижению стоимости ПО, уменьшению количества испытаний (до необходимого минимума) и проч. Для всего рынка систем цифрового проектирования и моделирования «точкой» роста может стать внедрение искусственного интеллекта, а также технологий облачных вычислений и хранения данных. Их использование может способствовать повышению скорости расчетных операций и быстродействия систем проектирования и моделирования за счет оптимизации процессов сложных вычислений. Это также может привести к повышению эффективности контроля данных и проведению их более качественного анализа, своевременному выявлению дефектов (на этапах проектирования и моделирования) и выполнения прогностической диагностики деталей с минимальным риском возникновения ошибок, которые в том числе могут быть вызваны несовместимостью ПО.

Высокая потребность глобального рынка в высокотехнологичных решениях и продуктах (изделиях) также способствует увеличению доли российского ПО и аппаратных средств на внутреннем рынке. Таким образом, деятельность по импортозамещению зарубежного ПО, создание консорциумов исследовательских институтов и компаний-производителей позволят вывести технологии на новый

уровень развития, перейти к росту числа разработок в этой области и ускорить их внедрение в производство.

Резюме

Библиометрический анализ публикационной активности в сфере цифрового проектирования и моделирования демонстрирует в целом положительную динамику количества публикаций как по миру в целом, так и по России. Тематиками одних из наиболее цитируемых работ по миру и по России за последние годы являются методы оптимизации дизайна конструкции изделий, изготавливаемых при помощи технологий трехмерной печати; способы повышения эффективности процессов печати изделий, а также обзорные работы на тему аддитивных технологий. Данная тенденция подтверждается результатами углубленного анализа направлений научно-исследовательских работ: наибольшими темпами прироста по количеству публикаций за 2018–2022 годы характеризуются аддитивное производство, а также методы адаптации и применения САМ-систем в различных отраслях промышленности.

Патентный анализ по технологиям CAD, CAM, CAE, CAE и HPC, PDM и PLM по миру и по России без привязки к конкретным компаниям-разработчикам за 1980–2022 годы показал, что Россия имеет определенные резервы для роста в части повышения общего количества патентов в сфере цифрового проектирования и моделирования. При этом мировыми лидерами по количеству полученных патентов в данной предметной области стали компании KHP, США и Японии.

Лидерами по количеству полученных патентов в сфере цифрового проектирования и моделирования стали коммерческие компании, среди которых Siemens (Германия), Fujitsu (Япония), компании, осуществляющие собственную деятельность в сфере авиационной и автомобильной промышленности. В России одно из лидирующих мест по количеству патентов занимает АО «АвтоВАЗ». Эти компании патентуют собственные методы цифрового проектирования и моделирования, позволяющие удовлетворить внутреннюю потребность в компьютерном инжиниринге, разработке программ для станков с ЧПУ, системах обработки информации и управления жизненным циклом изделий.

В ходе анализа патентной активности компаний-разработчиков программных систем и аппаратных решений в области цифрового проектирования и моделирования за 1980–2022 годы были выявлены следующие лидеры по числу патентов: Autodesk (США), Dassault Systèmes (Франция), Siemens (Германия). Примечательно, что данные компании разрабатывают наибольшее число программных систем различных классов. При этом их патентная активность в 2018–2022 годы замедлялась: наибольший прирост количества патентов за тот же временной промежуток наблюдался у менее известных на рынке компаний ZWSoft и GStarSoft (KHP), что указывает на скорый вывод на рынок новых программных систем и глобальной заинтересованности китайских компаний в рынке систем цифрового проектирования и моделирования²⁶.

Было установлено, что часть вендоров-разработчиков программных систем цифрового

²⁶ При этом стоит отметить, что компании-разработчики систем цифрового проектирования и моделирования регистрируют не только патенты, но и программы ЭВМ и базы данных, на которые не распространяется патентное право.

проектирования и моделирования в меньшей степени заинтересованы в патентовании своих разработок, в то время как крупные производственные предприятия напротив, в большей степени заинтересованы в патентовании отдельных узконаправленных методов проектирования и моделирования. Это в том числе может быть связано с тем, что программный код по российскому и международному законодательству охраняется авторским, а не патентным правом: российское законодательство указывает, что «компьютерные программы не являются изобретениями» (п. 5 ст. 1350 Гражданского Кодекса Российской Федерации [397]).

ГЛАВА 5. ПОКАЗАТЕЛИ ПО КОМПАНИЯМ «ТЕХНЕТ» НТИ, СПЕЦИАЛИЗИРУЮЩИХСЯ НА РАЗРАБОТКЕ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ, ВОВЛЕЧЕННЫМ В РЕАЛИЗАЦИЮ НАПРАВЛЕНИЯ НТИ

Глава подготовлена ИЦ «Технет» СПбПУ и МГУ имени М.В. Ломоносова

В данной главе представлены результаты анализа показателей деятельности компаний «Технет» НТИ, специализирующихся на разработке решений в области цифрового проектирования и моделирования, а также технологический ландшафт рынка, занимаемого исследуемыми компаниями НТИ.

5.1. Количество компаний НТИ

В рамках исследования был проведен анализ компаний, входящих в перечень компаний направления «Технет» НТИ, разрабатывающих программные системы и аппаратные решения в области цифрового проектирования и моделирования. Перечень исследуемых компаний был составлен на основе реестров «НТИ 1000» и Фонда «Сколково»²⁷.

При этом отсекающим критерием являлась разработка программных систем и аппаратных решений, определенных в Главе 4 настоящего исследования, то есть методологическая и терминологическая основа Главы 5 непосредственно связана с Главой 4. В результате анализа реестров «НТИ 1000» и Фонда «Сколково», а также результатов опроса было отобрано 15 компаний и 33 ПО/ решения, которые представлены далее в рамках разделов 5.1–5.8²⁸.

В рамках исследования рынка технологий цифрового проектирования и моделирования был проведен анализ компаний НТИ по специализации и географическому признаку, по выручке и экспортной выручке, а также по количеству прав на РИД (произведения науки, программы для ЭВМ, базы данных, изобретения, полезные модели, промышленные образцы, топологии интегральных микросхем). Итогом данного анализа является технологический ландшафт рынка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования.

5.2. Показатели по компаниям НТИ, вовлеченным в реализацию направления НТИ: количество компаний НТИ

Анализ данных о деятельности 15 рассматриваемых компаний позволяет сделать вывод об их достаточно неравномерном распределении с точки зрения того, на разработке каких классов систем специализируются компании. Большая часть рассмотренных компаний разрабатывает одновременно системы различных классов (6 компаний). Три компании разрабатывают только системы

²⁷ В категории «Рынки НТИ», «Технет», «Цифровое проектирование и моделирование».

²⁸ В связи с тем, что одна компания может разрабатывать несколько решений/ ПО/ и/или осуществлять несколько проектов, количество отобранных компаний и ПО/ решений разнится.

компьютерного проектирования (CAD-системы) и еще три только программные системы и аппаратное обеспечение в области высокопроизводительных вычислений (HPC-системы). Системы технологической подготовки производства (CAM-системы), компьютерного инжиниринга (CAE-системы) и технологии управления данными о продукте (PDM-системы) реализуются одним разработчиком соответственно. При этом среди рассмотренных компаний ни одна не разрабатывает исключительно системы управления жизненным циклом изделий (PLM-системы), требующие высокого уровня интеграции с системами на базе других технологий цифрового проектирования и моделирования. Все рассмотренные разработчики PLM-систем разрабатывают системы различных классов.

Ниже представлена данные по общей и средней выручке компаний по классам ПО. При этом для релевантного анализа компании были разделены на те, которые разрабатывают только одну программную систему и/или аппаратное обеспечение в области цифрового проектирования и моделирования, и на те, которые разрабатывают больше одного решения в области цифрового проектирования и моделирования.

Рисунок 47. Общая выручка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2021 год)²⁹



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

Наибольшую выручку за 2021 год имеют компании, разрабатывающие системы различных классов (в том числе разработчики PLM-систем), а также разработчики PDM-систем, наименьшую – разработчики CAE-систем³⁰. Схожая динамика наблюдается в отношении средней выручки по компаниям: наибольшую среднюю выручку за 2021 год также имеют разработчики систем различных классов, а наименьшую – CAE-систем³¹. Данные, представленные ниже, могут свидетельствовать о наибольшей заинтересованности потребителей в ПО, объединяющем в себе несколько

²⁹ Среди рассмотренных компаний ни одна не разрабатывает только системы управления жизненным циклом изделий (PLM-системы), требующие высокого уровня интеграции с системами на базе других технологий, поэтому все рассмотренные разработчики PLM-систем относятся к компаниям, разрабатывающим системы различных классов.

³⁰ Данные за 2022 год на момент написания отчета находились в открытом доступе в неполном объеме в связи с решением не раскрывать корпоративную информацию вплоть до 1 июля 2023 года. Поэтому в данной главе проводится сравнение данных за 2021 год [398].

³¹ В расчетах не учитывалась выручка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», так как в период 2019–2022 годов организация не публиковала данные в открытом доступе.

типов систем и/или обладающем высоким уровнем интеграции отдельных программных систем на базе различных технологий между собой³².

Рисунок 48. Средняя выручка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2021 год)



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

5.3. Краткое описание продуктов и услуг компаний НТИ

По результатам анализа компаний направления «Технет» НТИ было отобрано 15 компаний, разрабатывающих программные системы и аппаратные решения в области цифрового проектирования и моделирования. Из 33 рассмотренных решений/ПО наибольшее число относится к CAE-системам (9 решений/ПО) и CAD-системам (6 решений/ПО). Часть решений являются системами, объединяющими в себе несколько классов ПО (CAD и CAE).

У большинства российских разработчиков программных систем и аппаратных решений в области цифрового проектирования и моделирования средняя выручка за период 2017–2018 годов составила больше 100 млн рублей. При этом у большинства компаний отсутствует экспортная выручка.

Таблица 16. Компании, разрабатывающие системы цифрового проектирования и моделирования, перечень их решений и количество РИД

№	Наименование компании	Разрабатываемые системы	Количество РИД
1	ООО «ФИДЕСИС»	CAE Fidesys	83
2	ООО «ЭТТОН ГРУП»	Система прослеживаемости продукции «Эттон»	26
3		Etton.Pipe	
4	ООО «500M TEX.»	Интеллектуальная САПР СВЧ интегральных схем «Смекалец»	20
5	ООО «С-ИННОВАЦИИ»	Проект «Разработка и применение цифровых производственных технологий в производстве высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП)»	16

³² Также в рамках подготовки доклада был проведен географический анализ рассматриваемых компаний, результаты которого представлены в Приложении 7.

№	Наименование компании	Разрабатываемые системы	Количество РИД
6	АО «ЛОТОС»	LOTUS ЕСУИ	–
7	ООО «ОПТИБОТ»	Программно-аппаратная платформа для автоматизации производственных процессов на предприятиях в рамках концепции индустрии 4.0	–
8	ООО «РСК ЛАБС»	Технологии суперЭВМ экзафлопного уровня производительности	2
9	ООО «ЭЙЧПСИ ХАБ РИСЕРЧ»	HPC Hub	–
10	ООО «ЦЕНТР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ»	Технологии предсказательного моделирования процессов горения и взрыва с применением высокопроизводительных вычислений на базе супер-ЭВМ	–
11	ООО «БИГПРИНТЕР ЦИФРОВЫЕ ИННОВАЦИИ»	Программно-аппаратный комплекс (BPCS) для программного и электронного управления цифровыми струйными печатными системами	3
12	ООО «ЭРЕМЕКС»	САПР Delta Design	15
13	ЗАО «ТОП СИСТЕМЫ»	T-FLEX PLM Платформа	37
14		T-FLEX CAD	
15		T-FLEX CAD 2D+	
16		T-FLEX ЧПУ 2D	
17		T-FLEX ЧПУ 3D	
18		T-FLEX Анализ	
19		T-FLEX Динамика	
20		T-FLEX Зубчатые передачи	
21		T-FLEX Пружины	
22		T-FLEX PDM	
23	ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» (Госкорпорация «Росатом»)	СПЖЦ «Цифровое предприятие»	31
24		СПЖЦ.CAD	
25		СПЖЦ.CAM	
26		СПЖЦ.CAE	
27		СПЖЦ.PDM	
28		Пакет программ Логос	
29		Логос Аэро-Гидро	
30		Логос Тепло	
31		Логос Прочность	
32	ООО «1С»	1С: PDM Управление инженерными данными 3	70
33	Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ Петра Великого	CML-Bench®	35

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова на основе данных «НТИ 1000», системы СПАРК-Интерфакс, информационно-поисковой системы ФИПС, системы ЕГИСУ НИОКТР, 2023

Среди рассмотренных решений анализируемых компаний наибольшую долю составляют CAD- и CAE-системы: их общая доля составила 54,55% (27,27% приходится на CAE-системы, 18,18% приходится на CAD-системы, 9,09% приходится на системы, объединяющие в себе технологии CAD и CAE). Немного меньше доля решений/ПО у разработчиков САМ-систем – 12,12%. К наименее

распространенным среди компаний НТИ в разрезе разработки можно отнести НРС-, PDM-, PLM-системы: доля каждого направления составила по 9,09% (3 решения/ ПО). Кроме того, большинство из рассмотренных российских решений/ ПО ориентированы на внутренний рынок и мало представлены за рубежом: только у 2 компаний есть экспортная выручка (по данным за 2017–2019 годы).

5.4. Объемы выручки от продажи продуктов и услуг компаний НТИ в рамках сегментов направления НТИ

При рыночной оценке российских компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, был проведен анализ объемов выручки в разрезе технологического типа и динамики рынка последних лет. Информационной базой раздела была выбрана справочно-аналитическая система СПАРК-Интерфакс. В случае выпуска компанией продукции, принадлежащей к нескольким технологиям, общая выручка компании не учитывалась в разрезе отдельных технологий. Ниже представлены данные по объему выручки со связанными с ними другими параметрами.

Таблица 17. Объем выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования³³

№	Тип компании	Количество компаний НТИ в отрасли	Количество решений / ПО	Общая выручка за 2017 год, млн руб.	Общая выручка за 2021 год, млн руб.	Средняя выручка за 2021 год, млн руб.	Общая выручка за 2022 год, млн руб.	Относительный прирост общей выручки за 2021 год к 2017 году, %
1	Компании, разрабатывающие CAD-системы	3	3	750,38	202,57	67,52	-	-73,00
2	Компании, разрабатывающие CAM-системы	1	1	153,14	194,13	194,13	-	26,76

³³ 1. Среди рассмотренных компаний ни одна не разрабатывает только системы технологий управления жизненным циклом изделий (PLM-системы), требующие высокого уровня интеграции с системами на базе других технологий, поэтому все рассмотренные разработчики PLM-систем относятся к компаниям, разрабатывающим системы различных классов.
2. В расчетах общей и средней выручки не учитывались выручка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», так как в период 2019–2022 годов организация не публиковала данные в открытом доступе, а выручка компании за период 2017–2018 годов существенно искажает полученные результаты (около 100 млрд руб. за 2 года), так как ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – одно из ведущих отечественных предприятий, получающее большой объем выручки от реализации продуктов, не связанных с областью цифрового проектирования и моделирования.
3. Данные за 2022 год на момент написания отчета находились в открытом доступе в неполном объеме в связи с решением не раскрывать корпоративную информацию вплоть до 1 июля 2023 года.
4. Прирост выручки рассчитывался относительно 2017 года, так как справочно-аналитическая система СПАРК-Интерфакс предоставляет данные за последние 5 лет.

№	Тип компании	Количество компаний НТИ в отрасли	Количество решений / ПО	Общая выручка за 2017 год, млн руб.	Общая выручка за 2021 год, млн руб.	Средняя выручка за 2021 год, млн руб.	Общая выручка за 2022 год, млн руб.	Относительный прирост общей выручки за 2021 год к 2017 году, %
3	Компании, разрабатывающие САЕ-системы	1	1	36,79	33,64	33,64	97,40	-8,58
4	Компании, разрабатывающие ПО и аппаратное обеспечение на базе НРС	3	3	19,25	141,21	47,07	1,44	633,43
5	Компании, разрабатывающие PDM-системы	1	1	271,77	341,26	341,26	-	25,57
6	Компании, разрабатывающие системы различных классов	6	24	816,40	2 121,59	423,84	2 955,14	159,87

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

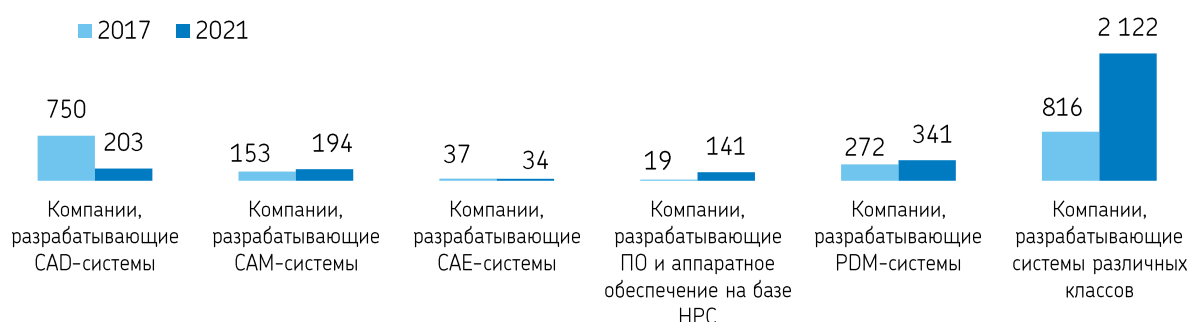
Наибольшее значение общей выручки можно отметить у компаний, разрабатывающих системы различных классов – в 2021 году данный показатель составил 2 121,59 млн руб. Выручка разработчиков PDM-систем и CAD-систем в 2021 году составила 341,26 млн руб. и 202,57 млн руб. соответственно. Меньших объемов выручки достигли компании-разработчики САМ-систем и разработчики ПО и аппаратного обеспечения на базе НРС: 194,13 млн руб. и 141,21 млн руб. соответственно. Наименьшие показатели общей выручки в 2021 году были у компании, разрабатывающей САЕ-системы – 33,64 млн руб. Высокие показатели общей выручки компаний, разрабатывающих системы различных классов, свидетельствуют о большом объеме спроса на различные программные системы на базе технологий цифрового проектирования и моделирования с возможностью быстрой интеграции между собой, позволяющей обрабатывать и контролировать множество гетерогенных инженерных данных на различных этапах проектирования и производства изделий.

По средней выручке в 2021 году также лидируют компании, разрабатывающих системы различных классов (423,84 млн руб.): высокие показатели средней выручки свидетельствуют о том, что средний заработок одной компании в данном направлении выше в сравнении с остальными компаниями, разрабатывающими меньшее число программных систем. Средняя выручка компаний в 2021 году, разрабатывающих PDM-системы, САМ-системы и САЕ-системы, совпала со значением общей выручки (341,26 млн руб., 194,13 млн руб. и 33,64 млн руб. соответственно): это связано с тем, что лишь одна компания серийно выпускает ПО на основе технологий управления данными о продукте и одна компания серийно выпускает ПО на основе технологий компьютерного

инжиниринга. Средняя выручка разработчиков CAD-систем в 2021 году достигла 67,52 млн руб., а разработчиков ПО и аппаратного обеспечения на базе HPC – 47,07 млн руб.

Ниже представлена аналитика данных по общей выручке компаний направления «Технет» НТИ в динамике.

Рисунок 49. Динамика общей выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017–2021 годы)³⁴



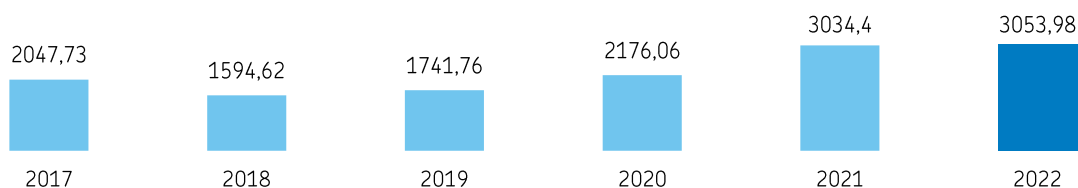
Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

По итогам анализа данных общей выручки компаний направления «Технет» НТИ в динамике можно сделать вывод о сильном росте выручки компаний, разрабатывающих ПО и аппаратное обеспечение на базе HPC: по сравнению с 2017 годом их выручка выросла в более чем в 6,3 раза в 2021 году. Это связано с активным развитием компаний данного направления и их ПО/ аппаратного обеспечения на рынке. Также высокие показатели продемонстрировали компании, разрабатывающие системы различных классов: их общая выручка в 2021 году выше показателей 2017 года в более чем 1,5 раза. Это связано с большим числом их продуктов, представленных на рынке. Также рост наблюдается у компаний, разрабатывающих САМ-системы и PDM-системы – на 26,77% и 25,57% по сравнению с 2017 годом соответственно. Для компаний, разрабатывающих САЕ-системы, характерно незначительное снижение выручки (на 8,58%), а самое большое снижение выручки отмечено у компаний-разработчиков CAD-систем – на 73,7%. Такой результат связан со снижением выручки отдельной компании (АО «Лотос»), которое может быть вызвано деятельностью компании, не связанной с областью цифрового проектирования и моделирования.

Результаты анализа изменения объема общей выручки компаний в сфере цифрового проектирования и моделирования с 2017 по 2022 годы представлены ниже.

³⁴ 1. Среди рассмотренных компаний ни одна не разрабатывает только системы технологий управления жизненным циклом изделий (PLM-системы), требующие высокого уровня интеграции с системами на базе других технологий, поэтому все рассмотренные разработчики PLM-систем относятся к компаниям, разрабатывающим системы различных классов.
2. В расчетах общей и средней выручки не учитывались выручка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», так как в период 2019–2022 годов организация не публиковала данные в открытом доступе, а выручка компании за период 2017–2018 годов существенно искажает полученные результаты (около 100 млрд руб. за 2 года), так как ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – одно из ведущих отечественных предприятий, получающее большой объем выручки от реализации продуктов, не связанных с областью цифрового проектирования и моделирования.

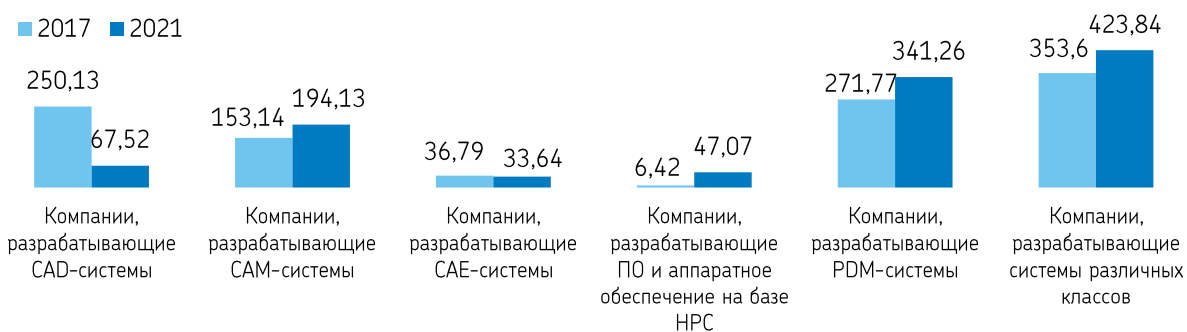
Рисунок 50. Динамика общей выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017–2022 годы)³⁵



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

По результатам анализа было определено, что на рынке существует тенденция к росту общей выручки компаний в рассматриваемый период, несмотря на снижение показателей в 2018 году, вызванное сокращением выручки отдельных компаний. Показатель 2021 года превышает аналогичный показатель 2017 года в 1,48 раза (CAGR – 10,33%). Далее представлены результаты анализа средней выручки компаний направления «Технет» НТИ в разрезе технологического типа.

Рисунок 51. Динамика средней выручки компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017 и 2021 годы)³⁶



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

³⁵ 1. Данные за 2022 год на момент написания отчета находились в открытом доступе в неполном объеме в связи с разрешением не раскрывать корпоративную информацию вплоть до 1 июля 2023 года [398].

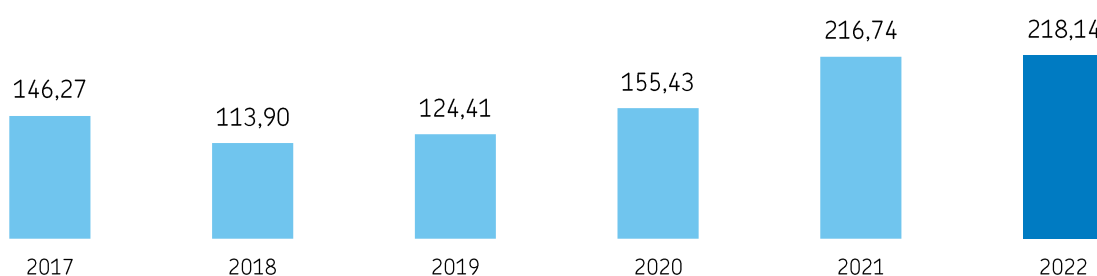
2. В расчетах общей и средней выручки не учитывались выручка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», так как в период 2019–2022 годов организация не публиковала данные в открытом доступе, а выручка компании за период 2017–2018 годов существенно искажает полученные результаты (около 100 млрд руб. за 2 года), так как ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – одно из ведущих отечественных предприятий, получающее большой объем выручки от реализации продуктов, не связанных с областью цифрового проектирования и моделирования.

³⁶ 1. Среди рассмотренных компаний ни одна не разрабатывает только системы технологий управления жизненным циклом изделий (PLM-системы), требующие высокого уровня интеграции с системами на базе других технологий, поэтому все рассмотренные разработчики PLM-систем относятся к компаниям, разрабатывающим системы различных классов.

2. В расчетах общей и средней выручки не учитывались выручка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», так как в период 2019–2022 годов организация не публиковала данные в открытом доступе, а выручка компании за период 2017–2018 годов существенно искажает полученные результаты (около 100 млрд руб. за 2 года), так как ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – одно из ведущих отечественных предприятий, получающее большой объем выручки от реализации продуктов, не связанных с областью цифрового проектирования и моделирования.

Анализ данных, представленных на рисунке выше, позволяет сделать вывод, что наиболее сильный рост средней выручки за период 2017–2021 годов наблюдался у компаний, разрабатывающих ПО и аппаратное обеспечение на базе НРС – на в более чем 6,3 раза. Это объясняется сильным ростом общей выручки компаний при небольшом числе компаний в данном направлении в целом на рынке. Кроме того, положительная динамика средней выручки наблюдалась у компаний, разрабатывающих САМ-системы (рост на 26,11%), PDM-системы (рост на 25,57%) и компаний, разрабатывающих системы различных классов (рост на 19,86%). Для компаний, разрабатывающих САЕ-системы, характерно незначительное снижение средней выручки (на 8,56%). Больше всего, на 73,01%, снизилась выручка компаний, разрабатывающих САД-системы: это обусловлено снижением выручки отдельной компании (АО «Лотос»). Ниже представлены изменения объема средней выручки компаний в течение периода 2017–2022 годов.

Рисунок 52. Динамика средней выручки от продажи решений/ ПО компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования (млн руб., 2017–2022 годы)³⁷



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023

Данные, представленные на рисунке выше, иллюстрируют постепенный рост средней выручки компаний после однократного снижения значений показателя в 2018 году. При этом наблюдается постепенное повышение темпов роста средней выручки компаний, что может означать рост доходов компаний.

Рост выручки от реализации средств цифрового моделирования и проектирования как по отдельным технологиям, так и по рынку в целом, свидетельствует об увеличении доли отечественного ПО на рынке цифрового проектирования и моделирования в условиях повсеместного внедрения информационных технологий в промышленность. Высокий спрос наблюдается на все типы систем, особый интерес наблюдается в том числе в разрезе PDM-систем.

³⁷ 1. Данные за 2022 год на момент написания отчета находились в открытом доступе в неполном объеме в связи с разрешением не раскрывать корпоративную информацию вплоть до 1 июля 2023 года [398].

2. В расчетах общей и средней выручки не учитывались выручка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», так как в период 2019–2022 годов организация не публиковала данные в открытом доступе, а выручка компании за период 2017–2018 годов существенно искажает полученные результаты (около 100 млрд руб. за 2 года), так как ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – одно из ведущих отечественных предприятий, получающее большой объем выручки от реализации продуктов, не связанных с областью цифрового проектирования и моделирования.

5.5. Количество компаний НТИ, имеющих экспортную выручку

Под экспортной выручкой понимается выручка, полученная от реализации решений/ ПО/ услуг на внешнем рынке. Оценка объемов экспортной выручки на зарубежных рынках в рамках каждой технологии позволяет сделать вывод о востребованности определенной продукции и перспективах развития отечественного рынка цифрового проектирования и моделирования в целом. Источником данных об экспортной выручке в рамках настоящего раздела является реестр «НТИ 1000», реестр Фонда «Сколково», результаты опроса технологических компаний НТИ, справочно-аналитическая система СПАРК-Интерфакс и официальные сайты компаний. Ниже представлены данные о количестве компаний, осуществляющих экспорт на зарубежные рынки, и доле экспорта в общем объеме выручки. Важно отметить, что данные по объему экспортной выручки в открытом доступе представлены в ограниченном объеме и за короткий период, наиболее репрезентативные данные представлены за 2019 год в реестре «НТИ1000», поэтому далее в анализе ключевым будет являться этот период.

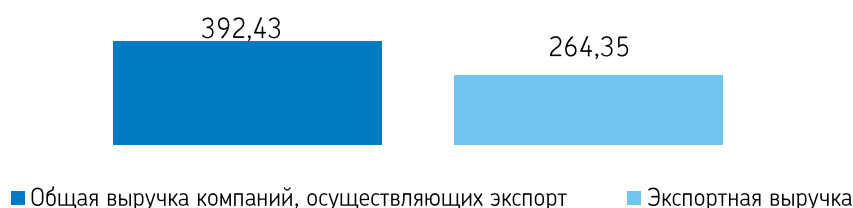
Таблица 18. Перечень компаний направления «Технет» НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, имеющих экспортную выручку (2019 год)³⁸

Тип компании	Количество компаний, имеющих экспортную выручку	Доля экспортной выручки по технологиям от общего объема выручки в 2019 году, %
Компании, разрабатывающие системы различных классов	2	67,36

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам реестра «НТИ 1000», 2023

По результатам анализа, из 15 рассматриваемых компаний всего у 2 компаний есть экспортная выручка, что эквивалентно 13,3%. Одна из них разрабатывает CAE-и PLM-системы, вторая – решения на базе CAD-, CAE- и PDM-систем.

Рисунок 53. Сравнение общей выручки рассмотренных компаний, осуществляющих экспорт, и их экспортной выручки по технологиям (млн руб., 2019 год)³⁹



Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова

³⁸ Компании с экспортной выручкой, разрабатывающие продукты/ осуществляющие проекты на основе CAD-, CAM-, HPC-, PDM-систем, отсутствуют.

³⁹ Компании с экспортной выручкой, разрабатывающие продукты/ осуществляющие проекты на основе CAD-, CAM-, HPC-, CAE-, PDM-систем, отсутствуют. Компании, разрабатывающие PLM-системы, учитываются среди компаний, разрабатывающих системы различных классов.

При этом потребность в импортозамещении зарубежного ПО и меры поддержки по развитию технологий могут способствовать в будущем замене зарубежных продуктов на российском рынке и созданию базы для экспорта российских продуктов на внешние рынки сбыта.

5.6. Объем экспортной выручки компаний НТИ

Общая экспортная выручка по каждой технологии рассчитывалась как сумма экспортной выручки компаний НТИ, выпускающих решения/ ПО в данной области. Ниже представлены показатели экспортной выручки компаний направления «Технет» НТИ.

Таблица 19. Объем выручки от продажи на внешний рынок решений/ ПО компаний направления «Технет» НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования⁴⁰

Тип компании	Общая экспортная выручка за 2017 год (млн руб.)	Общая экспортная выручка за 2018 год (млн руб.)	Общая экспортная выручка за 2019 год (млн руб.)
Компании, разрабатывающие системы различных классов	91,43	140,8	264,35

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023

По результатам анализа была выявлена тенденция роста общей экспортной выручки компаний в рассматриваемый период. Значение показателя 2019 года превышает аналогичное значение 2017 года в 2,9 раза (CAGR – 70,04%). Рост экспортной выручки может быть связан с возросшим интересом зарубежных заказчиков к продуктам российских компаний за счет их функциональности и доступности по цене в сравнении со многими зарубежными аналогами. Кроме того, вероятной причиной роста экспортной выручки могут быть различные меры поддержки по выводу российских решений на зарубежные рынки [399].

5.7. Количество прав на РИД, зарегистрированных компаниями НТИ

В рамках технологической оценки российских компаний, производящих средства цифрового проектирования и моделирования, был проведен анализ зарегистрированных прав на результаты интеллектуальной деятельности (РИД) следующих типов:

1. произведения науки;
2. программы для ЭВМ;
3. базы данных;
4. изобретения;
5. полезные модели;
6. топологии интегральных микросхем;

⁴⁰ Компании с экспортной выручкой, разрабатывающие продукты/ осуществляющие проекты на основе CAD-, CAM-, CAE-, HPC-, PDM-систем, отсутствуют. Компании, разрабатывающие PLM-системы, учитываются среди компаний, разрабатывающих системы различных классов.

7. секреты производства (ноу-хау).

Далее представлены результаты по количеству прав на РИД. Количество зарегистрированных исключительных прав на РИД внутри технологии считалось как сумма таких прав всех компаний, разрабатывающих данную технологию. Информация собиралась из открытых источников и с помощью опроса компаний направления «Технет» НТИ.

Таблица 20. Количество зарегистрированных РИД компаниями направления «Технет» НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, с разделением по классам ПО ⁴¹

№	Тип компании	Итого по компаниям						
		Произведения науки	Программы для ЭВМ	Базы данных	Изобретения	Полезные модели	Топологии интегральных микросхем	ИТОГО по компаниям
1	Компании, разрабатывающие САД-системы	3	12	0	0	0	0	15
2	Компании, разрабатывающие САМ-системы	0	0	0	3	0	0	3
3	Компании, разрабатывающие САЕ-системы	48	35	0	0	0	0	83
4	Компании, разрабатывающие ПО и аппаратное обеспечение на базе НРС	0	0	0	2	0	0	2
5	Компании, разрабатывающие PDM-системы	2	61	2	3	2	0	70
6	Компании, разрабатывающие системы различных классов	29	94	10	21	1	10	165
ИТОГО по количеству прав на РИД		82	202	12	29	3	10	338

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, Информационно-поисковой системы ФИПС и системы ЕГИСУ НИОКТР, 2023

Суммарно компаниями направления «Технет» НТИ по состоянию на 2023 год зарегистрировано 338 действительных прав на РИД в области технологий цифрового проектирования и моделирования. В технологическом разрезе наибольшее значение количества РИД было получено компаниями, разрабатывающими системы различных классов: у них зарегистрировано 165 прав на РИД. На втором месте находятся разработчики САЕ-систем с 83 правами на РИД по всем компаниям. Лидирующие позиции обеспечиваются существенным научно-исследовательским потенциалом в

⁴¹ Среди рассмотренных компаний ни одна не разрабатывает только системы управления жизненным циклом изделий (PLM-системы), требующие высокого уровня интеграции с системами на базе других технологий, поэтому все рассмотренные разработчики PLM-систем относятся к компаниям, разрабатывающим системы различных классов.

области данных технологий и высокой потребностью рынка в отечественных ПО/ решениях данного типа.

В разрезе по типам РИД лидируют программы для ЭВМ, их всего по компаниям зарегистрировано 202. На втором месте находятся произведения науки, их по всем компаниям зарегистрировано 82. Активная регистрация данных типов РИД объясняется технологической сложностью и большим объемом исследовательской активности в области цифрового проектирования и моделирования (особенно в отношении CAE-систем) со стороны рассматриваемых компаний «Технет» НТИ. Кроме того, в области цифрового проектирования и моделирования программная составляющая является ключевой в основе продуктов и проектов, разрабатываемых компаниями предметной области, что объясняет большое количество программ для ЭВМ в числе РИД.

Ввиду активного импортозамещения и усиления мер поддержки отечественных разработчиков можно ожидать роста числа исследований и повышения темпов регистрации РИД в сфере цифрового проектирования и моделирования для сокращения технологического разрыва между Россией и зарубежными странами в данном направлении.

5.8. Количество реализуемых проектов по отдельному направлению НТИ

В настоящее время деятельность большинства рассматриваемых компаний сконцентрирована на реализации проектов по импортозамещению программных решений, используемых в различных отраслях промышленности, что обусловлено санкционными ограничениями на приобретение зарубежного программного обеспечения. Данная работа поддержана на государственном уровне. Во исполнение поручений Председателя Правительства РФ Михаила Мишустина, данных на конференции «Цифровая индустрия промышленной России» («ЦИПР-2022»)[93], были созданы 32 индустриальных центра компетенций по замещению зарубежных отраслевых цифровых продуктов и решений (ИЦК) и 12 центров компетенций по развитию технологических решений / программного обеспечения (ЦКР), необходимых для замещения используемых в настоящее время зарубежных аналогов[96]. Проекты, разработанные ИЦК и ЦКР, вошли в дорожные карты высокотехнологичных направлений развития «Новое индустриальное программное обеспечение» (ДК НИПО) и «Новое общесистемное программное обеспечение» (ДК НОПО), которые были утверждены в декабре 2022 года[98].

На российском рынке представлены решения различных классов систем высокого уровня технологической готовности, например, CAE Fidesys (ООО «ФИДЕСИС»), T-FLEX PLM (ЗАО «ТОП СИСТЕМЫ»), ЛОГОС (ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ»/ Госкорпорация «Росатом») и другие. Но учитывая требования и отраслевую специфику промышленных компаний, некоторые разработчики осуществляют доработку своих систем, дополняя функциональными возможностями, специфичными для различных отраслей. Кроме того, компании, согласно внутренним планам развития, ведут работы по совершенствованию компонентов программных систем. Например, ЗАО «ТОП СИСТЕМЫ» ведет разработки ядра геометрического моделирования RGK, сеточных генераторов и других компонентов индустриального ПО [400].

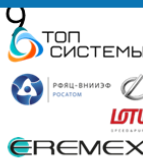
Наибольшая концентрация программных систем приходится на CAE- и CAD-системы: 30,3% и 18,2% соответственно от численности всех систем/ решений цифрового проектирования и

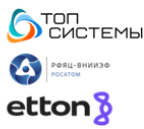
моделирования компаний направления «Технет» НТИ, 12,1% – САМ-системы, наименее распространены решения НРС-, PDM-, PLM-систем (доля каждого направления составила по 9%).

5.9. Технологический ландшафт рынка, занимаемого компаниями НТИ

В рамках проведенного исследования был сформирован технологический ландшафт цифрового проектирования и моделирования, занимаемого рассматриваемыми компаниями (отобранных из реестров «НТИ 1000» и Фонда «Сколково»). Технологический ландшафт основан на результатах анализа показателей деятельности рассматриваемых компаний (объем выручки, в том числе экспортной выручки, количество прав на РИД, разрабатываемые продукты).

Рисунок 54. Технологический ландшафт цифрового проектирования и моделирования

Компьютерное проектирование (CAD-системы)		
	Назначение: - Двухмерное черчение; - Трехмерное параметрическое моделирование поверхностей и объемных тел; - Геометрический анализ; - Среда для открытого взаимодействия всех участников процесса в сфере разработки и закупки изделий ...	Количество прав на РИД: - Произведения науки – 3 - Программы для ЭВМ – 12 - Итого: 15
Технологическая подготовка производства (CAM-системы)		
	Назначение: - Расчет траектории движения инструмента, режимов обработки для различных типов станков; - Создание управляющих программ станков с ЧПУ; - Имитационное моделирование и верификация обработки изделия; ...	Количество прав на РИД: - Изобретения – 3 - Итого: 3
Компьютерный инжиниринг (CAE-системы)		
	Назначение: - Анализ напряжений в деталях и сборках с применением МКЭ; - Анализ тепловых и жидкостных потоков методами вычислительной гидродинамики; - Анализ кинематики механизмов; - Моделирование динамического взаимодействия механических систем; - Моделирование производственных операций (литье, прессование и проч.); ...	Количество прав на РИД: - Произведения науки – 48 - Программы для ЭВМ – 35 - Итого: 83
Суперкомпьютерный инжиниринг (НРС-системы)		
	Назначение: - Параллельная обработка данных; - Решение сложных нелинейных задач; - Моделирование процессов аэро-, гидро-, газодинамики, теплопереноса, турбулентного перемешивания, прочности, деформации и др. ...	Количество прав на РИД: - Изобретения – 2 - Итого: 2
Технологии управления данными о продукте (PDM-системы)		
	Назначение: - Сбор, управление и предоставление информации об изделии; - Совместная работа всех пользователей с проектной информацией; - Синхронизация данных спецификации и иной информации об изделии; - Обеспечение коммуникации между внутренними и внешними пользователями; - Управление изменениями; ...	Количество прав на РИД: - Произведения науки – 2 - Программы для ЭВМ – 61 - Базы данных – 2 - Изобретения – 3 - Полезные модели – 2 - Итого: 70

Технологии управления жизненным циклом изделий (PLM-системы)	
	Назначение: • Сбор, хранение и предоставление информации о жизненном цикле продукта; • Управление требованиями, регламентами, документацией и отчетностью на всех этапах его жизненного цикла изделия; • Анализ, контроль качества и валидация данных об изделии на всех стадиях жизненного цикла; • Управление портфелями продуктов, программами и проектами; • Организация совместной работы различных команд; • ...
Другие решения в области цифрового проектирования и моделирования	
	Назначение • Компании, разрабатывающие системы или реализующие проекты в области технологий цифрового проектирования и моделирования

Источник: МГУ имени М.В. Ломоносова, ИЦ «Технет» СПбПУ, 2023

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Обзор деятельности международных организаций по нормативно-техническому регулированию

Приложение подготовлено ИЦ «Технет» СПбПУ

В Приложении приведены некоторые примеры деятельности международных организаций в области нормативно-технического регулирования технологий цифрового проектирования и моделирования.

ABNT (Бразилия)

Бразильская национальная организация по стандартизации (далее – ABNT) принимает участие в деятельности совместного технического комитета ISO / IEC JTC 1 «Информационные технологии» (Information technology) и входит в подкомитет ISO / IEC JTC 1 / SC 7 «Разработка программного обеспечения и систем» (Software and systems engineering), принятые стандарты которых распространяются и применяются на территории Бразилии [401; 402]. Также в рамках ABNT можно выделить деятельность специального комитета по регулированию области технологий Индустрии 4.0, в частности, среди подкомитетов указан ABNT / CB-021 – «Компьютеры и обработка данных» (Computadores e Processamento de Dados), однако подробно деятельность подкомитета и список принятых стандартов не приводится [403].

BIS (Индия)

Бюро индийских стандартов (далее – BIS) указана в качестве организации, принимающей участие в деятельности совместного международного комитета ISO / IEC JTC 1 «Информационные технологии» (Information technology), а также входящей в секретариат подкомитета по разработке программного обеспечения и систем ISO / IEC JTC 1 / SC 7 (Software and systems engineering) [404]. В связи с этим на территории Индии действуют принятые совместным техническим комитетом стандарты, в частности, по управлению документацией, жизненным циклом продукта, качеством программного обеспечения и др. [405–415]

Кроме этого, в рамках BIS функционирует технический комитет LITD C по техническому регулированию в области электроники, телекоммуникаций и информационных технологий (Electronics, Telecommunication and Information Technology Division Council). В состав LITD C входит 36 технических подкомитетов, среди которых можно выделить LITD 14 по разработке программного обеспечения и систем (Software And System Engineering Sectional Committee). К области деятельности LITD 14 относится разработка нормативно-технических документов, направленных на регулирование процессов вспомогательных средств и технологий для разработки программных продуктов и систем, а также управление ИТ-услугами [416; 417].

Среди нормативно-технических документов в области цифрового проектирования и моделирования, опубликованных BIS, можно привести стандарты на программное обеспечение систем безопасности для применения в ядерной и радиационной промышленности [418], управление

жизненным циклом программного продукта [419], управление тестированием программного обеспечения и др. [420; 421]

В 2021 году был подготовлен план действий в области национальной стандартизации Индии на период 2022–2027 годов, в рамках которого определены ключевые направления деятельности комитетов, приоритетные области развития технологий и др. [422] Так, в национальном плане стандартизации Индии была указана средняя и высокая приоритетность информационных технологий, в число которых вошли цифровые, интеллектуальные технологии, ИТ-сервисы и др.

SABS (ЮАР)

Деятельность Южноафриканского бюро стандартов (далее – SABS) в рамках нормативно-технического регулирования технологий цифрового проектирования и моделирования напрямую направлена на адаптацию стандартов, опубликованных международным совместным техническим комитетом ИСО и МЭК, под требования страны. В частности, в опубликованном в 2021 году каталоге принятых SABS-стандартов (Standards South Africa Catalogue) приведены следующие документы [423]:

- SANS 9126-4:2004 / ISO/IEC TR 9126-4:2004 (2014-05-09) Программирование. Качество продукта. Часть 4. Качество при использовании показателей (Software engineering – Product quality Part 4: Quality in use metrics) [424];
- SANS 19759:2007 / ISO/IEC TR 19759:2005 (2013-10-04) Разработка программного обеспечения. Совокупность знаний о разработке программного обеспечения. Руководство (Software Engineering – Guide to the Software Engineering Body of Knowledge, SWEBOK) [425];
- SANS 12207:2008 / ISO/IEC 12207:2008 (2014-03-28) Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств (Systems and software engineering – Software life cycle processes);
- SANS 14471:2009 / ISO/IEC TR 14471:2007 (2021-03-15) Информационные технологии. Программирование. Руководящие положения по принятию средств автоматизированной разработки программного обеспечения (Information technology – Software engineering – Guidelines for the adoption of CASE tools) [426];
- SANS 14764:2009 / ISO/IEC 14764:2006 (2019-01-25) Разработка программного обеспечения. Процессы жизненного цикла программного обеспечения. Сопровождение (Software Engineering – Software Life Cycle Processes – Maintenance) [427];
- SANS 16326:2012 / ISO/IEC/IEEE 16326:2009 (2017-03-03) Разработка систем и программного обеспечения. Процессы жизненного цикла. Управление проектом (Systems and software engineering – Life cycle processes – Project management) [428];
- SANS 14739-1:2015 / ISO 14739-1:2014 (2020-09-11) Управление документооборотом. Использование 3D в формате компактного представления документа (далее – PRC). Часть 1. PRC 10001 (Document management – 3D use of Product Representation Compact (PRC) format Part 1: PRC 10001) [429];
- SATR 24774:2016 / ISO/IEC TR 24774:2010 Разработка систем и программного обеспечения. Менеджмент жизненного цикла. Руководящие указания по описанию

- процесса (Systems and software engineering – Life cycle management – Guidelines for process description) [430];
- SATR 1727:2018 / ISO/IEC TR 20004:2015 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Уточненный анализ уязвимости программного обеспечения по ISO/IEC 15408 и ISO/IEC 18045 (Information technology – Security techniques – Refining software vulnerability analysis under ISO/IEC 15408 and ISO/IEC 18045) [431];
 - SANS 15288:2020 / ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла системы (Systems and software engineering – Systems life cycle processes) [432];
 - SANS 16350:2020 / ISO/IEC 16350:2015 Информационная технология. Проектирование систем и разработка программного обеспечения. Управление приложениями (Information technology – Systems and software engineering – Application management) [433];
 - SANS 90003:2020 / ISO/IEC IEEE 90003:2018 Разработка программного обеспечения. Руководящие указания по применению ISO 9001:2015 к компьютерному программному обеспечению (Software engineering – Guidelines for the application of ISO 9001:2015 to computer software) [434].

Также SABIS приводит перечень из 345 нормативных документов, принятых в области программного обеспечения [435]. При этом можно отметить, что принятие адаптированного стандарта на уровне ЮАР происходит в среднем на 2–6 лет позже опубликования аналогичного международного стандарта.

IEEE (США)

Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) проводит деятельность по подготовке стандартов в рамках комитета S2ESC «Разработка стандартов в области программного обеспечения и систем» (IEEE Software & Systems Engineering Standards Committee) [436]. Так, IEEE совместно с ИСО и МЭК подготовил масштабную серию нормативно-технических документов в области разработки программного обеспечения и систем (Systems and software engineering) [437–440]. Разработанная серия стандартов отличается углубленным анализом характеристик программного обеспечения и всесторонним обзором ключевых направлений разработки и применения программного обеспечения. В частности, подготовлен ряд стандартов по формированию основных требований к архитектуре программного обеспечения, проведению тестирования и оценки, обеспечению качества и безопасности, требованиям к документации и др. [441–448] Подготовленная серия стандартов стала базовым набором для применения при разработке инженерного программного обеспечения.

Отдельно можно выделить серию стандартов по обеспечению управления жизненным циклом изделий, разрабатываемых с применением программного обеспечения [449; 450], и жизненным циклом инженерного программного обеспечения [451–460], в том числе при применении CASE-инструментов [461; 462]. Однако стандартизация управления жизненным циклом изделий как направление нормативно-технического регулирования, так же как стандартизация в области

разработки и применения программных продуктов CAD, CAM, CAE, мало развита в рамках деятельности IEEE.

NIBS (США)

Национальный институт строительных наук США (National Institute of Building Sciences, NIBS) разработал Национальный CAD-стандарт США (The United States National CAD Standard, NCS) [463–466], версия которого регулярно обновляется. Документ регулирует обмен данными о проектировании зданий и сооружений на протяжении всего срока службы объекта.

SAE (США)

Общество автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE) приводит технический документ J826/3_202111, в котором описывает эталонную 3D-модель для станка, которая может служить основой для создания некоторой части CAD-системы [467]. Также SAE подготовил ряд других документов в области технологий цифрового проектирования и моделирования, например, по обучению применению CAE-систем и пр., и приводит ряд функционирующих технических комитетов по стандартизации в области программного обеспечения в автомобилестроении [468–470].

ASME (США)

Технические комитеты Американского общества инженеров-механиков (American Society of Mechanical Engineers, ASME), в свою очередь, также проводят деятельность в рамках нормативно-технического регулирования технологий цифрового проектирования и моделирования, в частности, технический комитет VVUQ 50 по проведению тестирования, валидации и оценки компьютерного моделирования [471]. Также можно привести технический документ Y14.41–2019 «Практики по применению цифровых данных для определения продукта» (Digital Product Definition Data Practices), в котором сформулированы основные требования к цифровому проектированию продукта [472].

NASA (США)

Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA) подготовило технический документ NASA-STD-7009 «Стандарт для моделей и моделирования» (Standard for Models and Simulations), содержащий основные принципы и требования к компьютерным моделям, рекомендации по разработке и применению результатов моделирования и пр. [473–476]

AIAA (США)

Американский институт аэронавтики и астронавтики США (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) в 2002 году опубликовал руководство по проведению верификации и валидации компьютерных моделей G-077–1998e (AIAA Guide for the Verification and Validation of

Computational Fluid Dynamics Simulations), которому должны следовать все подрядчики, подлежащие сертификации для участия в тендерах Министерства обороны США [477].

DIN, VDE и DKE (Германия)

Немецкий институт по стандартизации (Deutsches Institut für Normung e.V. / German Institute for Standardization, DIN) совместно с Немецким союзом электротехники (Verband Deutscher Elektrotechniker / Association of German Electricians, VDE), в том числе в рамках Немецкой комиссии по электротехнике, электронике и информационным технологиям при Немецком институте по стандартизации и Немецком союзе электротехники (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE / German Commission for Electrical, Electronic & Information Technologies of DIN and VDE; DKE), ведут деятельность по нормативно-техническому регулированию технологий CAD, CAM, PLM и PDM.

Так, в 2003 году был подготовлен технический отчет VDI 2218 «Информационные технологии в разработке продукции – Особенности технологии» (Information technology in product development – Feature Technology), в котором приведены CAD и CAM-технологии в качестве значимых для проведения разработки продукции и обеспечения ее качества [478; 479].

DIN и VDE также подготовили серию стандартов для применения 3D-моделей в процессе разработки промышленных инструментов [480; 481], серию стандартов по разработке и хранению цифровой технической документации (3D, CAD и PDM-данные) на продукцию аэрокосмической отрасли и др. [482; 483] CAD и CAM-технологии упоминаются применительно к нефтегазовой, аэрокосмической, судостроительной отраслям, железнодорожным объектам и др. отраслям промышленности в разрезе отраслевых стандартов, однако не приводится подробное описание деятельности отраслевых комитетов.

Отдельно DIN и VDE проводят разработку стандартов по внедрению PLM и PDM-систем в деятельность организаций, в частности, стандарты VDI 2219, DIN EN IEC 62443-4-1, VDE 0802-4-1:2018-10 и др. [484–487] Также DIN и VDE разрабатывают технические документы, направленные на обеспечение безопасности при интеграции CAE-систем и обмене данными [488–492]. Помимо этого, DIN и VDE принимают участие в деятельности совместного комитета ИСО и МЭК [493].

NAFEMS (Великобритания)

Национальное агентство конечно-элементных методов и стандартов Великобритании (National Agency for Finite Element Methods and Standards, NAFEMS) регулярно публикует руководства по применению технологий моделирования в различных отраслях промышленности, подготовленные международными организациями по стандартизации [494–496]. NAFEMS осуществляет стандартизацию не на национальном уровне, а преимущественно на уровне отдельных отраслей промышленности или отдельных организаций, которым необходимо применение стандартизированных процедур для повышения эффективности своей деятельности.

CEN и CENELEC (Бельгия)

Европейский комитет по стандартизации (Comité Européen de Normalisation / European Committee

for Standardization, CEN) совместно с Европейским комитетом электротехнической стандартизации (Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique / European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC) приводят два технических комитета по регулированию технологий в области программного обеспечения и цифрового проектирования и моделирования, в частности, CEN / TC 310 «Передовые технологии автоматизации и их применение» (Advanced automation technologies and their applications), в рамках деятельности которого разработаны стандарты по моделированию предприятий [497], и CEN / TC 304 «Информационные и коммуникационные технологии» (Information and communications technologies – European localization requirements), в рамках деятельности которого проводится программная и аппаратная поддержка для соответствия особенностям европейских стран [498].

ETSI (Франция)

Европейский институт по стандартизации в области телекоммуникаций (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) приводит технологический радар, содержащий перечень перспективных технологий. В качестве ключевых трендов на 2022 год ETSI выделил ряд технологий, среди которых высокопроизводительные компьютеры (High-performance computing, HPC), а также дополнительно отметил разработку цифровых двойников [499].

ECMA (Швейцария)

Ecma International (European Computer Manufacturers Association, ECMA) осуществляет стандартизацию в области информационных и телекоммуникационных технологий. В частности, Ecma приводит серии стандартов для применения в разных отраслях, направленные на осуществление передачи и представления данных, разработку программного обеспечения и др. [500]

Обзор подходов к международной стандартизации в области разработки цифровых двойников

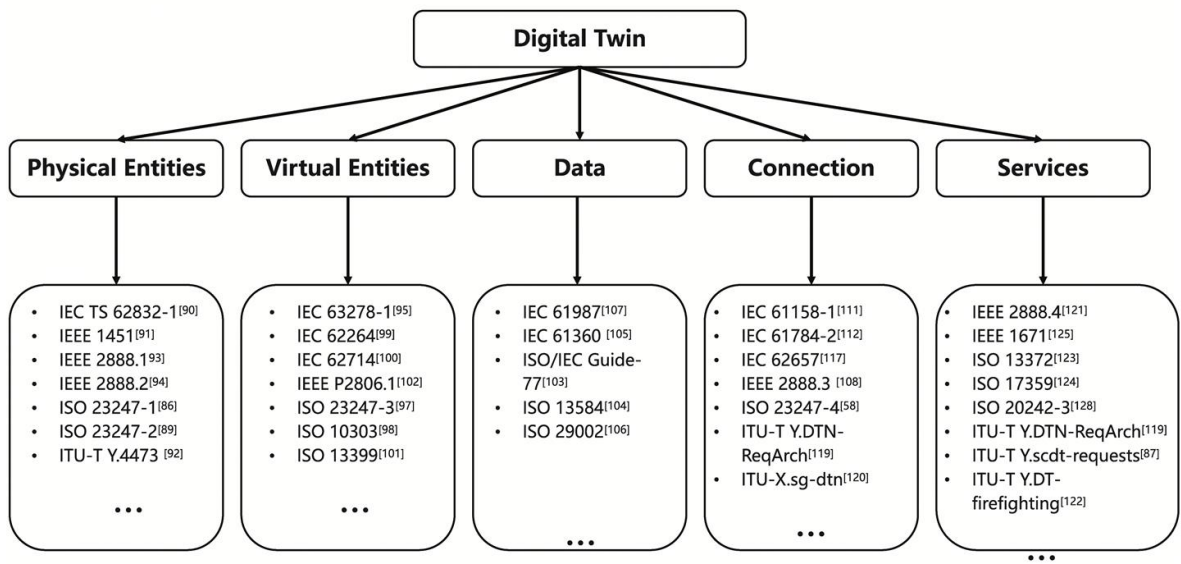
Существует ряд публикаций, в которых рассмотрены международные и отечественные стандартизированные схемы разработки программного обеспечения и применяемые при этом шаблоны и процедуры [501–519]. Например, Информационный центр Правительства Абу-Даби приводит ряд национальных стандартов, обеспечивающих управление обменом данными в системах [520].

Среди указанных выше публикаций стоит отметить обзор международных стандартов в области цифровых двойников, которые основываются на технологиях цифрового проектирования и моделирования [521]. Так, в обзоре приведен перечень стандартов ISO, IEC, ITU (Международный союз электросвязи, International Telecommunication Union) и IEEE в рамках 5 основных элементов цифрового двойника, среди которых физический объект (physical entity), виртуальный объект (virtual entity), данные цифрового двойника (digital twin data), связь (connection), сервисы (services). Рисунок 55 отражает перечень стандартов в области цифровых двойников, представленный в обзоре.

Часть упомянутых стандартов была рассмотрена в разделе 2.4, при этом масштабная деятельность проводится совместным техническим комитетом ISO / IEC JTC 1 / SC 41 «Интернет вещей и цифровые двойники» (Internet of Things and Digital Twin) [522]. Так, в результатах и планах работы

комитета приводится ряд принятых нормативно-технических документов, а также находящихся в разработке стандартов, среди которых, например, ISO / IEC 30173 ED1 «Цифровой двойник – Основные положения и терминология» (Digital Twin – Concepts and terminology) [523; 524].

Рисунок 55. Структура стандартов в области цифровых двойников



Источник: K. Wang, A review of the technology standards for enabling digital twin, 2022 [521]

При этом, как отмечают авторы обзора, большинство приведенных стандартов приняты в последние два года, что связано с новизной технологии цифровых двойников и незначительным количеством проектов по разработке цифрового двойника, находящихся на высоком уровне готовности. Тем не менее, реализация пилотных проектов по созданию цифровых двойников способствует развитию стандартизации в направлении цифрового проектирования и моделирования.

В качестве рекомендаций авторы обзора приводят алгоритм действий, направленных на развитие стандартизации в области цифровых двойников, среди которых отмечают разработку дорожной карты стандартов, пересмотр существующих стандартов на возможность применения в процессах разработки цифровых двойников, а также координацию международных комитетов для проведения совместной работы в данном направлении. Также предлагается определить приоритетность отраслей применения цифровых двойников в связи с потребностью в значительных ресурсах для разработки цифровых двойников.

Приложение 2. Перечень национальных стандартов в области цифрового проектирования и моделирования

Приложение подготовлено ИЦ «Технет» СПбПУ

Перечень национальных стандартов и предварительных национальных стандартов в области цифрового проектирования и моделирования для применения в промышленности, утвержденных по состоянию на май 2023 года:

- ГОСТ 2.052–2021 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения;
- ГОСТ 2.053–2013 Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения;
- ГОСТ 2.054–2013 Единая система конструкторской документации. Электронное описание изделия. Общие положения;
- ГОСТ 2.055–2014 Единая система конструкторской документации. Электронная спецификация. Общие положения;
- ГОСТ 2.056–2014 Единая система конструкторской документации. Электронная модель детали. Общие положения;
- ГОСТ Р 2.057–2019 Единая система конструкторской документации. Электронная модель сборочной единицы. Общие положения;
- ГОСТ Р 2.504–2021 Единая система конструкторской документации. Электронная конструкторская документация. Правила внесения изменений;
- ГОСТ Р 2.521–2021 Единая система конструкторской документации. Электронная конструкторская документация. Требования к форматам представления трехмерных геометрических моделей;
- ГОСТ 19.001–77 Единая система программной документации. Общие положения;
- ГОСТ 19.005–85 Единая система программной документации. Р-схемы алгоритмов и программ. Обозначения условные графические и правила выполнения;
- ГОСТ 19.101–77 Единая система программной документации. Виды программ и программных документов;
- ГОСТ 19.102–77 Единая система программной документации. Стадии разработки;
- ГОСТ 19.103–77 Единая система программной документации. Обозначение программ и программных документов;
- ГОСТ 19.104–78 Единая система программной документации. Основные надписи;
- ГОСТ 19.105–78 Единая система программной документации. Общие требования к программным документам;
- ГОСТ 19.106–78 Единая система программной документации. Требования к программным документам, выполненным печатным способом;
- ГОСТ 19.201–78 Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению;
- ГОСТ 19.202–78 Единая система программной документации. Спецификация. Требования к содержанию и оформлению;
- ГОСТ 19.301–79 Единая система программной документации. Программа и

- методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению;
- ГОСТ 19.401–78 Единая система программной документации. Текст программы. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.402–78 Единая система программной документации. Описание программы;
 - ГОСТ 19.403–79 Единая система программной документации. Ведомость держателей подлинников;
 - ГОСТ 19.404–79 Единая система программной документации. Пояснительная записка. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.501–78 Единая система программной документации. Формуляр. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.502–78 Единая система программной документации. Описание применения. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.503–79 Единая система программной документации. Руководство системного программиста. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.504–79 Единая система программной документации. Руководство программиста. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.505–79 Единая система программной документации. Руководство оператора. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.506–79 Единая система программной документации. Описание языка. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.507–79 Единая система программной документации. Ведомость эксплуатационных документов;
 - ГОСТ 19.508–79 Единая система программной документации. Руководство по техническому обслуживанию. Требования к содержанию и оформлению;
 - ГОСТ 19.601–78 Единая система программной документации. Общие правила дублирования, учета и хранения;
 - ГОСТ 19.602–78 Единая система программной документации. Правила дублирования, учета и хранения программных документов, выполненных печатным способом;
 - ГОСТ 19.603–78 Единая система программной документации. Общие правила внесения изменений;
 - ГОСТ 19.604–78 Единая система программной документации. Правила внесения изменений в программные документы, выполненные печатным способом;
 - ГОСТ 19.701–90 Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения;
 - ГОСТ 34.201–2020 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем;
 - ГОСТ 34.320–96 Информационные технологии. Система стандартов по базам данных. Концепции и терминология для концептуальной схемы и информационной базы;
 - ГОСТ 34.321–96 Информационные технологии. Система стандартов по базам данных. Эталонная модель управления данными;

- ГОСТ 34.601–90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания (по состоянию на июнь 2023 года статус – действующий, при этом принят ГОСТ Р 59793–2021);
- ГОСТ 34.602–2020 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93 Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению;
- ГОСТ Р ИСО 10303–21–2022 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 21. Методы реализации. Кодирование открытым текстом структуры обмена;
- ГОСТ Р ИСО 10303–41–2022 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 41. Интегрированный обобщенный ресурс. Основы описания и поддержки изделий;
- ГОСТ Р ИСО 10303–43–2022 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 43. Интегрированный обобщенный ресурс. Структуры представления;
- ГОСТ Р ИСО 10303–44–2022 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 44. Интегрированный обобщенный ресурс. Конфигурация структуры изделия;
- ГОСТ Р ИСО 10303–45–2022 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 45. Интегрированный обобщенный ресурс. Материал и другие технические характеристики;
- ГОСТ Р ИСО/ТС 10303–1317–2019 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1317. Прикладной модуль. Процедурная модель формы;
- ГОСТ Р ИСО/ТС 10303–1319–2019 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1319. Прикладной модуль. Объемная модель с локальным изменением;
- ГОСТ Р ИСО/ТС 10303–1320–2019 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1320. Прикладной модуль. Объемная модель с утолщенной поверхностью;
- ГОСТ Р ИСО/ТС 10303–1468–2019 Системы автоматизации производства их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1468. Прикладной модуль. Модель поведения на основе внешнего состояния;
- ГОСТ Р ИСО/ТС 10303–1231–2014 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1231. Прикладной модуль. Управление данными об изделии;
- ГОСТ Р ИСО 13584–1–2006 Системы автоматизации производства и их интеграция. Библиотека деталей. Часть 1. Обзор и основные принципы;
- ГОСТ Р ИСО 15531–44–2022 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Данные по управлению промышленным производством. Часть 44. Информационное моделирование сбора цеховых данных;
- ГОСТ Р ИСО 15926–1–2008 Промышленные автоматизированные системы и

интеграция. Интеграция данных жизненного цикла для перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Часть 1. Обзор и основополагающие принципы;

- ГОСТ 15971–90 Системы обработки информации. Термины и определения;
- ГОСТ Р ИСО 15926–2–2010 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Интеграция данных жизненного цикла для перерабатывающих предприятий, включая нефтяные и газовые производственные предприятия. Часть 2. Модель данных;
- ГОСТ Р ИСО 18828–2–2020 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Стандартизированные процедуры проектирования производственных систем. Часть 2. Процесс непрерывного планирования производства;
- ГОСТ Р ИСО 18828–3–2020 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Стандартизированные процедуры проектирования производственных систем. Часть 3. Информационные потоки в процессах производственного планирования;
- ГОСТ Р ИСО 18828–4–2020 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Стандартизированные процедуры проектирования производственных систем. Часть 4. Ключевые показатели эффективности процессов планирования производства;
- ГОСТ 19781–90 Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения;
- ГОСТ 23501.101–87 Системы автоматизированного проектирования. Основные положения;
- ГОСТ 23501.108–85 Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение;
- ГОСТ 28806–90 Качество программных средств. Термины и определения;
- ГОСТ Р 51904–2002 Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию;
- ГОСТ Р 54593–2011 Информационные технологии. Свободное программное обеспечение. Общие положения;
- ГОСТ Р 55346–2012 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Представление и обмен производственными данными. Базовая модель инженерного проектирования систем;
- ГОСТ Р 56136–2014 Управление жизненным циклом. Продукции военного назначения. Термины и определения;
- ГОСТ Р 56213.5–2014 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Обмен данными характеристик. Часть 5. Схема идентификации;
- ГОСТ Р 57188–2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57269–2016 Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения;
- ГОСТ Р 57700.1–2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования;

- ГОСТ Р 57700.2–2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения;
- ГОСТ Р 57700.3–2017 Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57700.4–2017 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в областях механики сплошных сред: гидромеханика, газовая динамика;
- ГОСТ Р 57700.5–2017 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в области механики течений в пористых средах;
- ГОСТ Р 57700.6–2017 «Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. Термины и определения в области бессеточных методов численного моделирования;
- ГОСТ Р 57700.7–2018 Численное моделирование физических процессов. Процессы ударного взаимодействия. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57700.8–2018 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование дозвуковых течений вязких жидкостей и газов. Верификация ПО;
- ГОСТ Р 57700.9–2018 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Верификация ПО;
- ГОСТ Р 57700.10–2018 Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области;
- ГОСТ Р 57700.11–2018 Численное моделирование физических процессов. Процессы ударного взаимодействия. Верификация и валидация численных моделей низкоскоростных ударов и внедрений. Требования;
- ГОСТ Р 57700.12–2018 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование сверхзвуковых течений невязких газов. Верификация ПО;
- ГОСТ Р 57700.13–2018 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование многофазной фильтрации. Верификация ПО;
- ГОСТ Р 57700.14–2018 Численное моделирование физических процессов. Верификация получаемых сеточными методами численных решений задач механики сплошной среды;
- ГОСТ Р 57700.15–2018 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование ламинарных течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО;
- ГОСТ Р 57700.16–2018 Численное моделирование физических процессов. Процессы ударного взаимодействия. Верификация и валидация численных моделей высокоскоростных ударов и внедрений. Общие требования;
- ГОСТ Р 57700.17–2018 Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование дозвуковых течений вязких жидкостей и газов. Валидация ПО;
- ГОСТ Р 57700.18–2019 Высокопроизводительные вычислительные системы. Требования к тестовым программам приемочных испытаний;
- ГОСТ Р 57700.19–2019 Численное моделирование динамических рабочих

- процессов в социотехнических системах. Требования к архитектуре процессов;
- ГОСТ Р 57700.20–2019 Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Общие положения;
- ГОСТ Р 57700.21–2020 Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57700.22–2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация;
- ГОСТ Р 57700.23–2020 Компьютерные модели и моделирование. Валидация. Общие положения;
- ГОСТ Р 57700.24–2020 Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис;
- ГОСТ Р 57700.25–2020 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации;
- ГОСТ Р 57700.26–2020 Высокопроизводительные вычислительные системы. Требования приемочных испытаний;
- ГОСТ Р 57700.27–2020 Высокопроизводительные вычислительные системы. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57700.36–2021 Высокопроизводительные вычислительные системы. Оценка производительности высокопроизводительных вычислительных систем на алгоритмах, использующих сверточные нейронные сети;
- ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения;
- ГОСТ Р 58299–2018 Управление данными об изделии. Порядок представления результатов проектно-конструкторских работ в электронной форме. Общие требования;
- ГОСТ Р 58300–2018 Управление данными об изделии. Термины и определения;
- ГОСТ Р 58301–2018 Управление данными об изделии. Электронный макет изделия. Общие требования;
- ГОСТ Р 58675–2019 Автоматизированная система управления данными об изделии. Общие требования;
- ГОСТ Р 58676–2019 Электронная конструкторская документация. Виды преобразований;
- ГОСТ Р 59792–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды испытаний автоматизированных систем;
- ГОСТ Р 59793–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания;
- ГОСТ Р 59795–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов;
- ГОСТ Р 59853–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения;
- ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014 Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология;
- ГОСТ Р 70201–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Оптимальное сочетание натурных и виртуальных испытаний электроники на

надежность и внешние воздействующие факторы. Требования и порядок проведения при выполнении технического задания на НИОКР;

- ГОСТ Р 70290–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Термины и определения;
- ГОСТ Р 70291–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Состав и структура системы автоматизированного проектирования электронной аппаратуры;
- ГОСТ Р 70607–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Состав и структура системы автоматизированного проектирования печатных узлов;
- ГОСТ Р 70608–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Состав и структура системы автоматизированного проектирования электронной компонентной базы;
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 90003–2014 Разработка программных продуктов. Руководящие указания по применению ИСО 9001:2008 при разработке программных продуктов;
- ПНСТ 647–2022 Умное производство. Системы автоматизации производства и их интеграция. Оценка конвергенции информатизации и индустриализации для промышленных предприятий. Часть 1. Структура и типовая модель;
- ПНСТ 648–2022 Умное производство. Системы автоматизации производства и их интеграция. Оценка конвергенции информатизации и индустриализации для промышленных предприятий. Часть 2. Модель зрелости и методология оценки;
- ПНСТ 670–2022 Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Требования к ИТ архитектуре процессов;
- ПНСТ 791–2022 Численное моделирование динамических рабочих процессов в социотехнических системах. Качество модели;
- ПНСТ 796–2022 Умное производство. Системы автоматизации производства и их интеграция. Стандартизированные процедуры проектирования производственных систем. Часть 5. Управление производственными изменениями;
- ПНСТ 797–2022 Умное производство. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 42. Интегрированные обобщенные ресурсы. Геометрическое и топологическое представление.

Приложение 3. Перечень нормативно-технических документов, выделенных в ходе опроса отечественных разработчиков программного обеспечения цифрового проектирования и моделирования. Agile-подход к разработке программного обеспечения

Приложение подготовлено ИЦ «Технет» СПбПУ

В рамках подготовки экспертно-аналитического доклада «Функциональные характеристики отечественных систем инженерного анализа», а также подготовки к конференции «Цифровая индустрия промышленной России» (31 мая – 2 июня 2023 года) в период с 12 по 18 мая 2023 года был проведен опрос среди отечественных разработчиков программного обеспечения [44; 222]. Опрос проведен Центром компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» и Инфраструктурным центром НТИ по направлению «Технет» СПбПУ – экспертными организациями, привлекаемыми для проведения научно-технической экспертизы результатов реализации соглашений о намерениях между Правительством РФ и заинтересованными организациями в целях развития отдельного высокотехнологичного направления «Новое индустриальное программное обеспечение» – совместно с АНО ЦКИТ.

По результатам опроса разработчиками программного обеспечения были приведены следующие нормативно-технические документы и дополнительные руководства, которые применяют организации при разработке и усовершенствовании программных продуктов:

- ГОСТ 2.103–2013 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки;
- ГОСТ 7.32–2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;
- ГОСТ 19.202–78 Единая система программной документации. Спецификация. Требования к содержанию и оформлению;
- ГОСТ 19.401–78 Единая система программной документации. Текст программы. Требования к содержанию и оформлению;
- ГОСТ Р 60.0.7.2–2020 Роботы и робототехнические устройства. Технология математического моделирования и виртуализации испытаний базовых элементов робототехнических комплексов на внешние воздействующие факторы на всех этапах жизненного цикла;
- ГОСТ Р 60.0.7.3–2020 Роботы и робототехнические устройства. Метод математического моделирования показателей надежности и виртуализации испытаний на надежность базовых элементов робототехнических комплексов при проектировании;
- ГОСТ Р 60.0.7.4–2020 Роботы и робототехнические устройства. Методы математического моделирования и виртуализации испытаний базовых элементов робототехнических комплексов на электромагнитные воздействия при проектировании;
- ГОСТ Р 60.0.7.5–2020 Роботы и робототехнические устройства. Методы построения баз данных электрорадиоизделий и конструкционных материалов для

математического моделирования и виртуализации испытаний базовых элементов робототехнических комплексов на внешние воздействующие факторы на всех этапах жизненного цикла;

- ГОСТ Р 51904–2002 Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию;
- ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения;
- ГОСТ Р 57700.1–2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования;
- ГОСТ Р 57700.25–2020 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации;
- ГОСТ Р 70201–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Оптимальное сочетание натурных и виртуальных испытаний электроники на надежность и внешние воздействующие факторы. Требования и порядок проведения при выполнении технического задания на НИОКР;
- ГОСТ Р 70290–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Термины и определения;
- ГОСТ Р 70291–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Состав и структура системы автоматизированного проектирования электронной аппаратуры;
- ГОСТ Р 70292–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Подсистема автоматизированного создания карт рабочих режимов электронной компонентной базы;
- ГОСТ Р 70293–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Подсистема автоматизированного анализа показателей надежности электронной аппаратуры;
- ГОСТ Р 70607–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Состав и структура системы автоматизированного проектирования печатных узлов;
- ГОСТ Р 70608–2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Состав и структура системы автоматизированного проектирования электронной компонентной базы;
- ГОСТ Р МЭК 60880–2010 Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категории А;
- ГОСТ Р МЭК 62279–2016 Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение систем управления и защиты на железных дорогах (EN 50128:2011 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems);
- DO 178B Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification [525];
- ISO / IEC 14882:2011 Information technology – Programming languages – C++ [526];
- серия стандартов ISO 9001 «Системы менеджмента качества» [527].

Также некоторые компании отметили применение внутренних регламентов разработки и тестирования программного обеспечения, управления требованиями, правил автоматического и ручного тестирования, руководство о стилях программирования, C++ Core Guidelines и др. [528] Кроме того, некоторые компании-разработчики отечественного инженерного программного обеспечения отметили, что в процессе разработки / улучшения программного обеспечения используют элементы Agile-подхода, в том числе такие, как Kanban, Scrum, а также Agile Manifesto.

Методы Agile-подхода зафиксированы в ряде нормативно-технических документов и руководствах. В частности, одним из первых документов в этой области является Манифест Agile «Разработка программного обеспечения» (Software Development), подготовленный в 2001 году американскими разработчиками [529; 530]. В манифесте закреплено 12 принципов Agile-подхода, следование которым позволит повысить эффективность процессов разработки программного обеспечения [531–534]. Дальнейшее развитие деятельности рабочей группы, подготовившей манифест, продолжается в рамках Agile Alliance [535; 536].

Как отмечают специалисты Atlassian, австралийского разработчика программного обеспечения, принципы Agile-подхода до сих пор являются актуальными для применения в сфере разработки программного обеспечения [537], а также в других видах деятельности.

Среди нормативно-правовых документов в области разработки программных продуктов с применением принципов Agile можно выделить, в частности, ISO / IEC TR 24587:2021 «Системная и программная инженерия. Гибкая методология разработки программного обеспечения. Соображения по гибкому внедрению» (Software and systems engineering – Agile development – Agile adoption considerations) [538; 539], ISO / IEC / IEEE 26515:2018 «Системная и программная инженерия. Информация для пользователей в гибкой среде разработки» (Systems and software engineering – Developing information for users in an agile environment) [540; 541], ISO / IEC TR 29119–6:2021 «Системная и программная инженерия. Тестирование программного обеспечения. Часть 6. Руководящие указания по использованию ISO / IEC / IEEE 29119 (все части) в гибких проектах» (Software and systems engineering – Software testing – Part 6: Guidelines for the use of ISO/IEC/IEEE 29119 (all parts) in agile projects) [542; 543] и др., при этом 7 стандартов находятся в разработке [544].

В рамках деятельности Института управления проектами США (Project Management Institute, PMI) был также подготовлен ряд документов по внедрению принципов Agile в деятельность организаций [545]. Так, в 2017 году совместно с Agile Alliance было подготовлено руководство по практике Agile, направленное на применение Agile в разработке компьютерного программного обеспечения [546; 547].

Помимо этого, Британский институт стандартов и Центр инновационных разработок Великобритании (Construction Innovation Hub) в рамках Национальной программы по разработке цифровых двойников Великобритании (National Digital Twin programme) подготовили белую книгу, посвященную необходимости разработки Agile-стандартов для применения в различных видах деятельности [548]. В частности, в белой книге отмечается, что Agile-подход зарекомендовал себя в разработке программного обеспечения и продолжает применяться для создания передовых программных продуктов, в связи с чем предлагается перенести принципы и подходы Agile на область разработки нормативно-технической документации.

Национальный институт стандартов и технологий также отмечает важность применения принципов

Agile для разработки нормативно-технических документов в связи с масштабами цифровой трансформации и распространением цифровых инструментов, в том числе цифрового проектирования и моделирования [549; 550].

В рамках ежегодного исследования применения Agile в России в 2022 году среди преимуществ применения практик, связанных с Agile, упомянута согласованность бизнес-процессов компании и ИТ-инфраструктуры [551]. Однако в национальной системе стандартов отсутствуют технические документы по применению Agile.

Приложение 4. Перспективный план стандартизации в области численного моделирования

Приложение подготовлено ИЦ «Технет» СПбПУ

Таблица 21. Перспективный план стандартизации в области передовых производственных технологий на 2018–2025 годы (с изменениями №1, №2) в области численного моделирования

№	Наименование, вид, категория разрабатываемого / пересматриваемого нормативного документа	Вид работы	Сроки выполнения	
			Начало	Окончание
1	Общие требования к трехмерному моделированию механических изделий	Разработка ГОСТ Р, Модификация ISO / CD 24351 – MOD	2023	2024
Стандарты в области численного моделирования				
2	Численное моделирование композиционных материалов. Общие положения	Разработка ГОСТ Р	2022	2023
3	Численное моделирование полимерных композиционных материалов. Верификация ПО	Разработка ГОСТ Р	2022	2023
4	Численное моделирование взаимодействия конструкций с потоками жидкости или газа. Валидация программного обеспечения	Разработка ГОСТ Р	2022	2023
5	Численное моделирование физических процессов. Бессеточные методы в численном моделировании физических процессов. Верификация программного обеспечения	Разработка ГОСТ Р	2022	2023
6	Численное моделирование физических процессов. Численное моделирование в области электромагнитной динамики. Валидация программного обеспечения	Разработка ГОСТ Р	2022	2023

Источник: Министерство промышленности и торговли РФ, Росстандарт, 2022 [552–554]

Приложение 5. Стартапы в области цифрового проектирования и моделирования

Приложение подготовлено ИЦ «Технет» СПбПУ

Таблица 22. Успешные стартапы в области цифрового проектирования и моделирования в 2022 году

№	Компания	Страна	Сфера деятельности	Технология	Продукт / решение	Размер привлеченных инвестиций (млн долл.)	Последний раунд инвестиций
1	canibuild	Австралия	Строительная промышленность	CAD	Компьютерное моделирование зданий и территорий для застройки	13	Раунд А
2	CANOA	США	Строительная промышленность, обустройство дома	CAD	Компьютерное моделирование интерьера и проектирование квартир	10,2	Посевной раунд
3	Ergeon	США	Строительная промышленность, обустройство дома	CAD	Компьютерное моделирование забора частных домов и его взаимодействия с травой/землей	40	Раунд В
4	Mighty Buildings	США	Строительная промышленность	CAD	Создание и персонализация домов при помощи компьютерного проектирования, моделирования, робототехники	101,8	Раунд В
5	Snaptrude	США	Строительная промышленность	CAD	Компьютерное моделирование зданий с оценкой стоимости, сложности, климатических условий	7,8	Посевной раунд
6	Croptimistic Technology	Канада	Агрокультурная промышленность	CAM	Создание технологичной агрокультурной	14,3	Раунд В

№	Компания	Страна	Сфера деятельности	Технология	Продукт / решение	Размер привлеченных инвестиций (млн долл.)	Последний раунд инвестиций
					среды при помощи передовых технологий, среди которых технологическая подготовка производства		
7	Productive Machines	Великобритания	Аэрокосмическая и автомобильная промышленности	CAM	Создание компонентов для автомобилей и самолетов при помощи технологической подготовки производства и цифровых двойников	2,3	Посевной раунд
8	ScaleNC	Германия	Облачные вычисления, промышленное производство	CAM	Предложение услуг для производства листового металла на облачных платформах	4	Посевной раунд
9	Toolpath	США	Машинное обучение, разработка платформы	CAM	Разработка платформы распределенной обработки, которая создает детали с ЧПУ для ускорения инноваций от прототипа до производства.	6	Предпосевной раунд
10	Wyze Labs	США	«Умный» дом	CAM	Создание и обустройство «умных» домов при помощи технологической подготовки производства и облачных устройств Интернета вещей	155	Раунд В

№	Компания	Страна	Сфера деятельности	Технология	Продукт / решение	Размер привлеченных инвестиций (млн долл.)	Последний раунд инвестиций
11	Augment Simulation Healthcare	Индия	Здравоохранение	CAE	Разработка CAE решений в сфере здравоохранения для Индии	Нет данных	Нет данных
12	BosongPSI	Индия	Квантовые вычисления, разработка ПО	CAE	Корпоративное программное обеспечение для инженерного моделирования на базе SaaS, использующее возможности квантовых вычислений	0,6	Предпосевной раунд
13	Keyword	Германия	Искусственный интеллект и машинное обучение	CAE	Разработка ИИ с элементами компьютерного инжиниринга	0,03	Предпосевной раунд
14	Supreium	Индия	Квантовые вычисления, разработка ПО	CAE	Корпоративное программное обеспечение для инженерного моделирования на базе SaaS, использующее возможности квантовых вычислений	0,6	Предпосевной раунд
15	Three M Software Private Limited	Индия	Разработка ПО	CAE	Разработка универсального ПО с применением технологий компьютерного инжиниринга	Нет данных	Нет данных
16	CoreWeave	США	Облачные вычисления	HPC	Специализированный облачный провайдер, обеспечивающий масштабные рабочие	576,5	Раунд В

№	Компания	Страна	Сфера деятельности	Технология	Продукт / решение	Размер привлеченных инвестиций (млн долл.)	Последний раунд инвестиций
					нагрузки с GPU-ускорением (AI, VFX и HPC).		
17	HPC-AI Technology	Сингапур	Облачные вычисления и искусственный интеллект	HPC	Создание облачной платформы для улучшения вычислений ИИ за счет увеличения скорости обработки данных на CPU и GPU	6	Раунд А
18	IQM Quantum Computers	Финляндия	Квантовые вычисления	HPC	Разработка и создания квантовых компьютеров с фокусом на сверхпроводящие технологии	233,8	Раунд А
19	NextSilicon	Израиль	Электронная промышленность	HPC	Решение фундаментальных проблем при помощи нового подхода к HPC-архитектуре	202,6	Раунд С
20	SiPearl	Франция	Сетевое оборудование и аппаратное обеспечение	HPC	Создание первого в мире энергоэффективного микропроцессора для HPC, предназначенного для работы с любым ускорителем сторонних производителей	116,2	Раунд А
21	Aletiq	Франция	Разработка ПО	PLM	Программное обеспечение для управления жизненным циклом изделия	1,7	Посевной раунд
22	FRONTIER.COOL	Тайвань	Индустрия моды	PLM	Цифровизация материалов и	2,2	Посевной раунд

№	Компания	Страна	Сфера деятельности	Технология	Продукт / решение	Размер привлеченных инвестиций (млн долл.)	Последний раунд инвестиций
					управление жизненным циклом изделий для индустрии моды		
23	Ganister	Франция	Цифровая трансформация	PLM	Помощь компаниям в цифровой трансформации, предоставление ПО для управления жизненным циклом изделий	0,35	Предпосевной раунд
24	Noreja	Австрия	Аналитика, разработка ПО	PLM	Программное обеспечение для интеллектуального анализа данных и управления жизненным циклом изделий	0,3	Посевной раунд
25	Optalio	Германия	Разработка ПО	PLM	Программное обеспечение для аналитики и управления жизненным циклом изделия	0,2	Посевной раунд

Источник: ИЦ «Технет» СПбПУ по материалам Crunchbase, 2023 [295]

Приложение 6. Расшифровка кодов международной патентной классификации

Приложение подготовлено МГУ имени М.В.Ломоносова

Таблица 23. Расшифровка кодов международной патентной классификации (МПК)

Код ⁴²	Расшифровка кода
B22D-019	Наплавка металла на внутреннюю или внешнюю поверхность заготовок или изделий
B23C-003	Фрезерования специальных изделий; особые способы фрезерования; станки для этого
B25J-013	Управление манипуляторами
B29C-045	Инжекционное формование, т. е. нагнетание требуемого объема формуемого материала через насадку в закрытую форму; устройства для этого
B60W-030	Цели систем управления дорожными транспортными средствами, иные чем управление отдельным узлом, например систем, использующих комбинированное управление узлами транспортного средства
G05B-017	Системы с использованием моделей или моделирующих устройств
G05B-019	Системы программного управления
G06F-003	Вводные устройства для передачи данных, подлежащих преобразованию в форму, пригодную для обработки в вычислительной машине; выводные устройства для передачи данных из устройств обработки в устройства вывода, например интерфейсы
G06F-003	Вводные устройства для передачи данных, подлежащих преобразованию в форму, пригодную для обработки в вычислительной машине; выводные устройства для передачи данных из устройств обработки в устройства вывода, например интерфейсы
G06F-007	Способы и устройства для обработки данных с воздействием на порядок их расположения или на содержание обрабатываемых данных
G06F-008	Мероприятия по разработке программного обеспечения (тестирование или отладка; административные, планирующие или организационные аспекты управления проектами программного обеспечения)
G06F-015	Цифровые компьютеры вообще; оборудование для обработки данных вообще
G06F-016	Поиск информации; структура базы данных; структура файловой системы
G06F-017	Устройства или методы цифровых вычислений или обработки данных, специально предназначенные для специфических функций
G06F-019	Устройства или способы цифровых вычислений или обработки данных для специальных применений
G06F-030	Компьютерное проектирование (CAD)
G06G-007	Устройства, в которых вычислительные операции выполняются путем изменения электрических или магнитных величин
G06Q-010	Администрирование, например автоматизация делопроизводства или бронирование; менеджмент, например управление ресурсами или проектами

⁴² Коды МПК трех портфелей патентов с наибольшей общей суммой значений отдельных патентов внутреннего индекса Questel Orbit «сила патента».

G06Q-030	Торговля, например маркетинг, шоппинг, выписывание счетов, аукционы или электронная торговля
G06T-015	Передача трехмерного (3D) изображения, например от модели к побитовому изображению
G06T-017	Моделирование трехмерного (3D) изображения, например описание данных от трехмерного (3D) изображения объектов
G06T-019	Обработка 3D моделей или изображений для машинной графики

Источник: МГУ имени М.В.Ломоносова на основе данных ВОИС

Приложение 7. Географический анализ компаний

Приложение подготовлено МГУ имени М.В.Ломоносова

Географическое расположение компании определялось по месту регистрации головного офиса. Компании НТИ, занимающиеся разработкой средств цифрового проектирования и моделирования, представлены в 6 субъектах Российской Федерации. При этом в 5 субъектах зарегистрировано по одной компании. Лидером рейтинга является город Москва, что обосновывается научной, инфраструктурной и экономической развитостью данного субъекта, а также возможностью наиболее удобного взаимодействия с контрагентами.

Таблица 24. Распределение компаний, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, по регионам (единицы)

№	Субъект	Количество компаний
1	Москва	10
2	Санкт-Петербург	1
3	Нижегородская область	1
4	Республика Татарстан	1
5	Томская область	1
6	Свердловская область	1

Источник: МГУ имени М.В.Ломоносова, 2023 год

Далее представлен анализ величины средней выручки компаний НТИ по субъектам Российской Федерации. Лидерами рейтинга по средней выручке компаний за 2021 год являются Санкт-Петербург и Москва. Высокие позиции данных субъектов в рейтинге связаны с наличием компаний, масштабы деятельности которых кратно превышают показатели других компаний, а также тем фактом, что наибольшее число компаний НТИ, работающих в сфере цифрового проектирования и моделирования, зарегистрировано в Москве (10 компаний).

Таблица 25. Средняя выручка рассмотренных компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, по субъекту Российской Федерации (млн руб., 2021 год)⁴³

№	Субъект	Средняя выручка
1	Москва	188,52
2	Санкт-Петербург	215,75

⁴³ Данные по компаниям «Технет» НТИ, расположенным в Нижегородской области, не публикуются в открытом доступе, в таблице это отражено прочерком.

№	Субъект	Средняя выручка
3	Нижегородская область	Нет данных
4	Республика Татарстан	18,35
5	Томская область	2,4
6	Свердловская область	155,1

Источник: МГУ имени М.В.Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023 год

Рисунок 56. Средняя выручка компаний НТИ, разрабатывающих системы цифрового проектирования и моделирования, по субъекту Российской Федерации (млн руб., 2021 год)



Источник: МГУ имени М.В.Ломоносова по материалам системы СПАРК-Интерфакс, 2023 год

По результатам анализа было определено, что представленность российских компаний в субъектах Российской Федерации напрямую коррелирует с научными, экономическими, инфраструктурными и логистическими особенностями региона.

Приложение 8. Дайджест ключевых событий по тематике цифрового проектирования и моделирования в рамках направления «Технет» НТИ в мире и в России

Приложение подготовлено ИАФЦ СПбПУ



Декабрь 2022: В России утверждены «дорожные карты» «Новое индустриальное программное обеспечение» и «Новое общесистемное программное обеспечение»

Принятые документы являются итогом системной работы, организованной по поручению Председателя Правительства Михаила Мишустина в рамках индустриальных центров компетенций (далее – ИЦК) и центров компетенций по развитию общесистемного и прикладного ПО (далее – ЦРК). Реализация «дорожных карт» направлена на создание и внедрение отечественного индустриального программного обеспечения и достижение технологической независимости нашей страны, в частности – за счет проектов предприятий-лидеров российских отраслей. Среди данных компаний: Объединенная судостроительная корпорация, группа компаний «Калашников», аэропорт Шереметьево, АО «Трансмашхолдинг», «Русагро», «М-Видео», ПАО «Новатэк», ПАО «Лукойл», ПАО «Северсталь». Проекты включают программные решения по направлениям PLM, CAE, CAD, MES, SCADA, CRM, ERP, DBMS, OS, GIS, BIM, EDMC и другим. «Дорожные карты» носят открытый характер, соответственно, в них также могут быть включены новые компании и проекты.

Дорожная карта «Новое индустриальное программное обеспечение», в частности, предусматривает три направления развития индустриального софта: системы автоматизации проектирования и управления жизненным циклом изделий, системы «интернета вещей» и платформы для управления ресурсами и процессами предприятий.

В 2023 году значение индекса технологической независимости в области промышленного ПО должно составить 53,5%, в 2024–56,7%, в 2025 – превысить 60%. К 2030 году более 80% потребностей предприятий в программном обеспечении должно закрываться за счет отечественных разработок. При этом доля российского ПО для автоматизации к 2030 году должна вырасти до 90% с 41% в 2021, производственных платформ на

Источники:

- <http://government.ru/news/47353/>
- https://www.vedomosti.ru/press_releases/2022/12/19/utverzhdennaya-dorozhnaya-karta-po-napravleniyu-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie-realizuemaya-pri-koordinatsii-rosatoma

базе интернета вещей – с 41,5% до 76,8%, управленческих платформ – с 78,5% до 92,3%.

Большая часть проектов «дорожных карт» (на общую сумму более 200 млрд рублей) будет реализована за счет собственных средств предприятий, в том числе в рамках заключения соглашений с Правительством о создании условий по обеспечению гарантированного спроса на продукты.

По словам замглавы Минцифры Максима Паршина, утверждение «дорожных карт» – это веха в масштабной работе по импортозамещению, цифровой трансформации бизнеса и развитию российских ИТ-продуктов.



Февраль–март 2023: Китайский опыт проектирования системы электроснабжения для военного судна с помощью искусственного интеллекта

Источники:

- <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3213056/china-ai-warship-designer-did-nearly-years-work-day>
- <https://asiatimes.com/2023/03/ai-warship-designer-accelerating-chinas-naval-lead/>

Специалисты Китайского центра проектирования и исследования кораблей разработали систему на основе искусственного интеллекта (далее – ИИ) для проектирования системы электроснабжения военных судов. Система на базе ИИ за один день решает комплексную задачу, на выполнение которой инженерам, использующим традиционные инструменты CAD / CAM / CAE, потребовалось бы в 300 раз больше времени – почти целый год.

По словам разработчиков, ИИ способен действовать со 100% точностью, при том, что «в базе» ошибки при проектировании систем электроснабжения военных судов неизбежны – современный военный корабль представляет собой чрезвычайно сложное и масштабное инженерное сооружение – и на их выявление и устранение может уходить очень много времени.

Исследование выполнялось при поддержке Вооруженных сил КНР. Результаты опубликованы в китайском научном журнале «Компьютеризированные производственные системы».



Март 2023: Инструменты автоматизации проектирования электроники от Huawei

Huawei завершила работу над платформой, объединяющей инструменты автоматизации проектирования электроники (Electronic design automation, EDA) для компоновки и изготовления чипов с технологическими узлами от 14 нанометров. Китайские СМИ сообщают, что вышеуказанная платформа является одной из 78, разрабатываемых гигантом телекоммуникационного оборудования для замены американских и европейских цифровых инструментов проектирования микросхем, ставших объектами экспортного контроля США и других стран.

В настоящий момент рынок средств автоматизации электронного проектирования в значительной степени контролируется тремя компаниями: калифорнийскими Synopsys и Cadence, а также немецкой Siemens. По данным отраслевых обозревателей TrendForce, на эти три компании приходится примерно 75% рынка EDA, что создает проблему для китайских производителей ввиду усиливающегося экспортного контроля и других ограничений.

При этом китайская полупроводниковая промышленность все еще на два-три поколения отстает от тайваньской, южнокорейской и американской. В частности, тайваньская компания по производству полупроводников TSMC и южнокорейская группа компаний Samsung наращивают производство чипов с технологическими узлами до 3 нанометров, в то время как компания Intel (США) заявила, что к концу следующего года у нее будет чип на базе двух-нанометрового техпроцесса.

Уменьшение техпроцесса делает чипы более производительными, что качественно влияет на работу системы охлаждения и скорость зарядки. Также это влияет и на дизайн устройств, в которые их встраивают. Чем меньше чип, тем компактнее устройство.

Источники:

- https://www.theregister.com/2023/03/24/huawei_eda_14nm_chips/
- <https://www.chinadaily.com.cn/a/202303/24/WS641d36a4a31057c47ebb65fb.html>



**Massachusetts
Institute of
Technology**

Март-апрель 2023: Система автоматизированного проектирования, позволяющая производителям встраивать датчики в шестерни и другие вращательные механизмы всего за один проход на 3D-принтере

Инженеры Массачусетского технологического института (США) разработали программный модуль MechSense на базе системы автоматизированного проектирования SolidWorks.

Программный продукт SolidWorks является самым распространенным инструментом, используемым для автоматизированного проектирования (CAD/ CAM / CAE / PDM) и 3D-моделирования. Расширение MechSense позволяет «встраивать» датчики во вращательные механизмы при 3D-печати, что, в свою очередь, дает возможность быстро прототипировать устройства с вращающимися частями (например, турбины или моторы) с интегрированными датчиками. Кроме того, программный модуль MechSense может быть полезен при создании осязаемых пользовательских интерфейсов для сред с дополненной реальностью, где датчики необходимы для отслеживания движений пользователя и взаимодействия с объектами.

Для того чтобы интегрировать датчик в движущийся механизм и не нарушить при этом движения устройства, были использованы емкостные датчики – преобразователи параметрического типа, в которых изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкости конденсатора. Конденсатор состоит из двух пластин из проводящего материала, между которыми зажат изолирующий материал. Если площадь перекрытия или расстояние между проводящими пластинами изменяется, в частности, за счет вращения механизма, емкостный датчик может обнаруживать результирующие изменения электрического поля между пластинами. Затем эту информацию можно использовать, например, для расчета скорости.

На данном этапе программный модуль MechSense использовался для создания прототипов таких устройств, как умная настольная лампа, меняющая цвет и яркость света в зависимости от того, как пользователь поворачивает нижнюю или среднюю часть, и планетарная коробка передач, наподобие тех, что используются в манипуляторах, а также колесо, измеряющее расстояние при движении по поверхности. Исследователи планируют изучить специфику печати различными

Источники:

- <https://news.mit.edu/2023/3d-printing-revolving-devices-sensors-0316>
- <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3544548.3581361>

материалами и улучшить конструкцию датчика, чтобы уменьшить количество ошибок, а также разработать печатаемые датчики для других движущихся механизмов.

Работа выполнена при поддержке Accenture Labs, при частичном финансировании за счет средств гранта международной консалтинговой компании Accenture. Результаты опубликованы в сборнике материалов конференции «Человеческий фактор в вычислительных системах (Conference on Human Factors in Computing Systems 2023, CHI 2023)».



Май 2023: Новый метод обратного проектирования, значительно увеличивающий скорость разработки топливных элементов

Команда инженеров из Североамериканского исследовательского института Toyota (Toyota Research Institute of North America, TRINA; США) разработала методологию обратного проектирования топливных элементов на основе компьютерного моделирования. Методология позволяет определять наиболее значимые эксплуатационные характеристики и настраивать алгоритмы создания конструкций, обладающих данными характеристиками, что способствует сокращению временных затрат на исследования и разработки проточных пластин для топливных элементов. В качестве инструментальной базы исследования использовано программное обеспечение COMSOL Multiphysics, разработанное международной компанией COMSOL.

Источники:

- <https://www.3dcadworld.com/new-inverse-design-method-accelerates-fuel-cell-development/>
- <https://www.comsol.ru/story/generative-design-puts-hydrogen-fuel-cell-development-in-high-gear-116191>

Апробация методологии проведена в рамках проектирования микроканальных пластин, направляющих движение жидких реактивов в микрореакторах, в частности – в водородно-кислородных топливных элементах.

Результаты исследования опубликованы в журнале «Chemical Engineering Journal».



РОСАТОМ

Май-июнь 2023: Развитие платформ компьютерного моделирования – проекты ГК «Росатом»

В рамках VIII ежегодной конференции «Цифровая индустрия промышленной России», объединяющей представителей бизнеса и власти по вопросам цифровой трансформации общества и ключевых отраслей экономики, проходившей с 31 мая по 2 июня, Госкорпорация «Росатом» объявила о создании САЕ-платформы в единой программной среде «Логос Платформа» и ее последующем распространении в промышленности и образовании. Заказчиками станет ряд крупных российских предприятий, таких как публичное акционерное общество «Газпром».

Система позволит моделировать процессы в таких областях, как аэро-, гидро-, газодинамика, многофазные и многокомпонентные течения, теплопередача, электромагнетизм, механика твердого деформируемого тела и разрушения.

Источники:

- <https://cipr.ru/news/na-cipr-2023-mihail-mishustin-dal-ryad-poruchenij-dlya-dostizheniya-tehnologicheskogo-suvereniteta/>
- https://t.me/government_rus/7499

Подключение к САЕ-платформе стартапов и разработок предприятий позволит уже через 2 года достигнуть соответствия мировым стандартам.

Кроме того, «Росатом» разрабатывает PLM-систему тяжелого класса на базе технологически независимой платформы «Сарус». Это система управления жизненным циклом на этапах проектирования, моделирования, управления инженерными данными, а также проектирования и управления эксплуатацией.



RESEARCH AND MARKETS
THE WORLD'S LARGEST MARKET RESEARCH STORE

Июнь 2023: Мировой рынок средств цифрового проектирования и моделирования в ближайшие годы ожидает уверенный рост

Источники:

- <https://a2zmarketresearch.com/tehnologicheskogo-suvereniteta/>
- <https://www.researchandmarkets.com/>

По оценкам консалтингового агентства A2Z Market Research (США) в 2023–2029 годах среднегодовой темп роста мирового рынка средств цифрового проектирования и моделирования (CAD / CAM / CAE) составит 8%. Международное консалтинговое агентство ResearchAndMarkets ожидает среднегодовой рост рынка на уровне 8.75% (с 55,6 млрд долл. в 2023 году до 84,5 млрд долл. в 2028 году). В качестве ключевого фактора роста аналитики выделяют потребность в интеллектуальных решениях, в частности – способствующих экономии ресурсов.



Июнь 2023: В рамках конференции «Цифровая индустрия промышленной России» прошло обсуждение ключевых особенностей отечественного рынка CAE-систем на современном этапе

Круглый стол «Комплексный подход в разработке систем анализа и инженерных расчетов (Computer-aided engineering, CAE)» состоялся в рамках VIII ежегодной конференции «Цифровая индустрия промышленной России» 2 июня 2023 года. Участники дискуссии – представители промышленности, образования и разработчики отечественных CAE-систем – обсудили основные потребности промышленности в данной сфере, трудности, с которыми сталкивается отрасль при переходе на отечественные решения, инфраструктурное оснащение промышленности для проведения суперкомпьютерного моделирования и т. д.

Одним из спикеров круглого стола стал руководитель Комитета по проведению научно-технической экспертизы реализации «дорожных карт» по развитию высокотехнологичных направлений «Новое промышленное программное обеспечение» и «Новое общественное программное обеспечение», проректор по цифровой трансформации СПбПУ, руководитель Передовой инженерной школы (далее – ПИШ) СПбПУ «Цифровой инжиниринг» Алексей Иванович Боровков. Алексей Иванович выделил глобальные технологические тренды развития Нового промышленного программного обеспечения и CAE-систем, к которым относятся:

- Цифровые двойники;
- Платформизация, облачные сервисы, инструменты коллаборации, микросервисы;
- Искусственный интеллект, машинное обучение;
- Дополнения и виртуальная реальность, иммерсивная реальность, метавселенная;
- Блокчейн, цифровая идентификация, Web3, NFT;
- Интернет вещей, продвинутые технологии подключения.

В рамках круглого стола также выступил руководитель Центра компетенций по новым производственным технологиям АНО «Центр компетенций по импортозамещению в сфере информационно-

коммуникационных технологий» (далее – ЦКИТ) Александр Данилин. В своем выступлении Александр Данилин обозначил ряд направлений, в которых имеются резервы развития функциональных возможностей отечественных решений, выявленных в результате анализа рынка программных систем инженерных расчетов:

- Сложные инженерные расчеты (далее – CAE) в машиностроении и других высокотехнологичных отраслях (статическая, усталостная и динамическая прочность, аэро- и гидродинамика, газодинамика, акустика, электромагнитные задачи, геомеханика и др.);
- Потребности в решениях с элементами искусственного интеллекта (техническое обслуживание и ремонт оборудования на базе предиктивной аналитики, контроль качества продукции с использованием компьютерного зрения, когнитивных сервисов, анализа больших данных, автономные системы и т. д.);
- Цифровые двойники сложных технических объектов (машиностроение, двигателестроение, авиастроение, судостроение и кораблестроение, высокотехнологичное оборудование во всех отраслях промышленности);
- ПО для проектирования, строительства и эксплуатации сложных промышленных объектов и инфраструктуры;
- CAD и PLM, платформенные решения, интеграция данных отечественных решений CAD и CAE, прямое чтение и миграция данных с зарубежных программных систем, CAD для электроники, электрооборудования и объектов энергетики;
- Прочие функциональные характеристики, включающие мониторинг воздушного пространства на опасных производственных объектах, цифровые архивы технической документации сложных изделий, аддитивное производство и т. д.

Источник:

- <https://fea.ru/news/8502>

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Большой экономический словарь: 25000 терминов / ред. А.Н. Азрилиян. – Изд. 6-е, доп. – М: Институт новой экономики, 2004. – 1376 с.
2. 3D CAD Software Global Market [Электронный ресурс] : Report / Research and Markets – 2023. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5767420/3d-cad-software-global-market-report> (дата обращения: 26.04.2023).
3. 3D CAD Software Market Size, Trends [Электронный ресурс] : Global Forecast To 2032. / The Business Research Company. – 2023. – URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/3d-cad-software-global-market-report> (дата обращения: 26.04.2023).
4. Computer-Aided Design Market Size [Электронный ресурс] : Global Report 2022 – 2030. / Market Research Future. – 2023. – URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/computer-aided-design-market-8531> (дата обращения: 26.04.2023).
5. Global 3D CAD Software Market [Электронный ресурс] : Size, Share & Trends Analysis Report by Deployment (Cloud, On-premise), by Application (Manufacturing, Healthcare), by Region (North America, APAC), and Segment Forecasts, 2021–2028. / Research and Markets. – 2021. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4761179/global-3d-cad-software-market-size-share-and> (дата обращения: 21.11.2022).
6. 3D CAD Software Market [Электронный ресурс] : Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022–2027. / Imarc. – 2022. – URL: <https://www.imarcgroup.com/3d-cad-software-market> (дата обращения: 21.11.2022).
7. Computer Aided Design Market [Электронный ресурс] : Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Component (Software, Services); By Technology (3D Technology, 2D Technology); By Application; By Industry; By Region; Segment Forecast, 2022 – 2030. / Polaris Market Research. – 2022. – URL: <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/computer-aided-design-cad-market> (дата обращения: 21.11.2022).
8. Computer-Aided Engineering Market [Электронный ресурс] : Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023–2028. / Research and Markets. – 2023. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5769401/computer-aided-engineering-market-global> (дата обращения: 26.04.2023).
9. Computer-Aided Engineering Market Size [Электронный ресурс] : Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023–2028. / imarc. – 2023. – URL: <https://www.imarcgroup.com/computer-aided-engineering-market> (дата обращения: 26.04.2023).
10. Computer Aided Engineering Market [Электронный ресурс] : Size, Share, and Trend Analysis By Component. / Grand View Research. – 2023. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/computer-aided-engineering-cae-market> (дата обращения: 27.04.2023).
11. Computer Aided Engineering (CAE) [Электронный ресурс] : Global Market Trajectory & Analytics. / Research and Markets. – 2022. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5139748/computer-aided-engineering-cae-global-market> (дата обращения: 21.11.2022).
12. Computer-aided Engineering (CAE) Market [Электронный ресурс] : Size, Growth, Trends [2029]. / Fortune Business Insights. – 2022. – URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/computer-aided-engineering-market-106891> (дата обращения: 26.04.2023).

- 21.11.2022).
13. Computer-Aided Engineering Market [Электронный ресурс] : Size, Share, Analysis 2022-2027. / Imarc. – 2022. – URL: <https://www.imarcgroup.com/computer-aided-engineering-market> (дата обращения: 21.11.2022).
 14. High Performance Computing (HPC) [Электронный ресурс] : Market Report / Market Research Future. – 2023. – URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/high-performance-computing-market-2698> (дата обращения: 27.04.2023).
 15. High-performance Computing Market Size [Электронный ресурс] : Share 2023-2028. / imarc. – 2023. – URL: <https://www.imarcgroup.com/high-performance-computing-market> (дата обращения: 27.04.2023).
 16. High Performance Computing Market [Электронный ресурс] : Size, Share & Trends Analysis Report. / Grand View Research. – 2023. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/high-performance-computing-market> (дата обращения: 27.04.2023).
 17. High Performance Computing Market [Электронный ресурс] : Global Market Size, Trend Analysis, Segment Forecast, Regional Outlook 2022-2030. / Precedence Research. – 2022. – URL: <https://www.precedenceresearch.com/high-performance-computing-market> (дата обращения: 21.11.2022).
 18. High Performance Computing Market Size USD 50.3 Billion by 2028 [Электронный ресурс] : High Performance Computing Market Global Industry Assessment & Forecast. / Vantage Market Research. – 2021. – URL: <https://www.vantagemarketresearch.com> (дата обращения: 21.11.2022).
 19. High Performance Computing Market Size Analysis, 2022-2030 [Электронный ресурс] : Share Analysis by Component (Server, Storage, Networking Devices, Software, Services), Deployment (On-Premises, Cloud), Enterprise Size (SMEs, Large Enterprises), Vertical (BFSI, Media and Entertainment, Retail, Transportation, Government and Defense, Education and Research, Manufacturing, Healthcare and Lifescience) – Global Industry Growth Forecast to 2030. / PS Intelligence. – 2022. – URL: <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/high-performance-computing-hpc-market> (дата обращения: 21.11.2022).
 20. CAM Software Market [Электронный ресурс] : Global Industry Analysis and Forecast (2022-2029). / Maximize Market Research. – 2022. – URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-cam-software-market/102401/> (дата обращения: 27.04.2023).
 21. Computer-aided manufacturing (CAM) Market [Электронный ресурс] : Market Overview. / EnterpriseAppsToday. – 2023. – URL: <https://www.enterpriseappstoday.com/news/computer-aided-manufacturing-cam-market-will-reach-around-usd-7-07-bn-by-2033.html> (дата обращения: 26.04.2023).
 22. Computer Aided Manufacturing (CAM) Market [Электронный ресурс] : Size, Share, Growth Analysis, By Component, Deployment Type, Application - Industry Forecast 2022-2028. / SkyQuest. – 2023. – URL: <https://www.skyquestt.com/report/computer-aided-manufacturing-market> (дата обращения: 26.04.2023).
 23. Computer-Aided Manufacturing Market Research Report by Component, Product Type, Organization Type, Deployment, Application, Region [Электронный ресурс] : Market Report / ReportLinker. – 2023. – URL: <https://www.reportlinker.com/p06391522/Computer-Aided-Manufacturing-Market-Research-Report-by-Component-Product-Type-Organization-Type-Deployment-Application-Region-Cumulative-Impact-of-COVID-19-Russia-Ukraine-Conflict->

- and-High-Inflation-Global-Forecast.html (дата обращения: 26.06.2023).
24. Computer-Aided Manufacturing – Global Market Trajectory & Analytics [Электронный ресурс] : Global Computer-Aided Manufacturing Market to Reach \$5.1 Billion by 2027. / Research and Markets. – 2022. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5302918/computer-aided-manufacturing-global-market> (дата обращения: 21.11.2022).
 25. Computer Aided Manufacturing Market [Электронный ресурс] : Computer Aided Manufacturing Market By Deployment Type, By Component, By Organization Size, By Industry and By Region: Industry Analysis, Market Share, Revenue Opportunity, Competitive Analysis and Forecast 2021-2028. / Future Market Analytics. – 2021. – URL: <https://futuremarketanalytics.com/report/computer-aided-manufacturing-market/> (дата обращения: 21.11.2022).
 26. Computer Aided Manufacturing Market Size [Электронный ресурс] : Computer Aided Manufacturing Market Statistics: 2028. / Allied Market Research. – 2021. – URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/CAM-software-market> (дата обращения: 21.11.2022).
 27. Product Lifecycle Management Market [Электронный ресурс] : Forecast Report 2030. / P&S Intelligence. – 2023. – URL: <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/product-lifecycle-management-market> (дата обращения: 27.04.2023).
 28. Product Lifecycle Management Market Size [Электронный ресурс] : USD 53.29 Billion by 2030. / Vantage Market Research. – 2023. – URL: <https://www.vantagemarketresearch.com> (дата обращения: 27.04.2023).
 29. Product Lifecycle Management Global Market [Электронный ресурс] : Report 2023. / Research and Markets. – 2023. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5767531/product-lifecycle-management-global-market-report> (дата обращения: 27.04.2023).
 30. Product Lifecycle Management Global Market Report 2022 [Электронный ресурс] : By Component, Deployment, End-User. / Research and Markets. – 2022. – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5561604/product-lifecycle-management-global-market-report> (дата обращения: 22.11.2022).
 31. Product Lifecycle Management Market Size USD 42.8 Billion by 2028 [Электронный ресурс] : Product Lifecycle Management Market Global Industry Assessment & Forecast. / Vantage Market Research. – 2022. – URL: <https://www.vantagemarketresearch.com> (дата обращения: 22.11.2022).
 32. Product Lifecycle Management Market Trend [Электронный ресурс] : PLM Industry Forecast by 2030. / Emergen Research. – 2022. – URL: <https://www.emergenresearch.com/amp/industry-report/product-lifecycle-management-market> (дата обращения: 22.11.2022).
 33. Global Product Data Management (PDM) Software Market [Электронный ресурс] : Market Report / Dataintel. – 2022. – URL: <https://dataintel.com/report/global-product-data-management-%28pdm%29-software-market/> (дата обращения: 28.06.2023).
 34. Product Data Management (PDM) Software Market Size, Share, and Trends Analysis by 2030 [Электронный ресурс] : Market Size, Share, and Trends Analysis by 2030. / Regional Research Reports. – 2022. – URL: <https://www.regionalresearchreports.com/> (дата обращения: 22.11.2022).
 35. Strategic Analysis of an Industry [Электронный ресурс] : CFA Exam Study Notes. – AnalystPrep, 2019. – URL: <https://analystprep.com/cfa-level-1-exam/equity/strategic-analysis-industry/> (дата обращения: 30.06.2023).
 36. 3D CAD Software Market Size [Электронный ресурс] : Share & Trends Analysis Report. / Grand View Research. – 2022. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d->

- cad-software-market (дата обращения: 17.05.2023).
37. 3D Cad Software Market Scope & Analysis Report 2032 [Электронный ресурс] : By Deployment, etc. / market.us. – 2022. – URL: <https://market.us/report/3d-cad-software-market/> (дата обращения: 17.05.2023).
 38. Computer Aided Engineering Market [Электронный ресурс] : Trends 2022-2032. / market.us. – 2022. – URL: <https://market.us/report/computer-aided-engineering-market/> (дата обращения: 17.05.2023).
 39. Russell J. Hyperion: HPC Market is Stabilizing and Headed to \$50B by 2026 [Электронный ресурс] : HPC Market. / HPCwire. – 2022. – URL: <https://www.hpcwire.com/2022/05/30/hyperion-hpc-market-is-stabilizing-and-headed-to-50b-by-2026/> (дата обращения: 17.05.2023).
 40. Computer-Aided Manufacturing (CAM) [Электронный ресурс] : Market Size, Share, Trend, Growth to 2022-2030. / Straits Research. – 2022. – URL: <https://straitsresearch.com/report/computer-aided-manufacturing-market> (дата обращения: 17.05.2023).
 41. Product Lifecycle Management (PLM) Market Size [Электронный ресурс] : Forecast, and Trend Highlights Over 2022 - 2031. / Research Nester. – 2022. – URL: <https://www.researchnester.com/reports/product-lifecycle-management-market/98> (дата обращения: 17.05.2023).
 42. Product Lifecycle Management Market Size, Share [Электронный ресурс] : Trends Analysis Report. / Grand View Research. – 2022. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/product-lifecycle-management-market> (дата обращения: 17.05.2023).
 43. Product Data Management Market [Электронный ресурс] : Market Report / Transparency Market Research. – 2020. – URL: <https://www.transparencymarketresearch.com/product-data-management-market.html> (дата обращения: 28.06.2023).
 44. Алексей Боровков выступил ключевым спикером сессии «Комплексный подход в разработке систем анализа и инженерных расчетов (CAE)» в рамках конференции ЦИПР-2023 – FEA.RU | CompMechLab – разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/HPC [Электронный ресурс]. – URL: <https://fea.ru/news/8502> (дата обращения: 29.06.2023).
 45. Конференция ЦИПР. Комплексный подход в разработке систем анализа и инженерных расчетов (CAE) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=MeM5Bwk6X_Q (дата обращения: 29.06.2023).
 46. Challenging the Barriers to High Performance Computing in the Cloud. AWS. Intel [Электронный ресурс]. – URL: <https://d1.awsstatic.com/HPC2019/Challenging-Barriers-to-HPC-in-the-cloud-Oct2019.pdf> (дата обращения: 29.06.2023).
 47. Глобальные тренды в инженерном образовании / А.И. Боровков [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Гуманитарные и общественные науки. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 58-76.
 48. NLM History of Medicine Division Finding Aids [Электронный ресурс]. – URL: <https://findingaids.nlm.nih.gov/repositories/4/resources/925> (дата обращения: 05.06.2023).
 49. McBride S. Edge Computing Is Leading The Next Great Tech Revolution [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.forbes.com/sites/stephenmcbride1/2020/11/16/edge-computing-is-leading-the-next-great-tech-revolution/> (дата обращения: 21.06.2023).
 50. Ezell S. A New Frontier: Sustaining U.S. High-Performance Computing Leadership in an

- Exascale Era. A New Frontier / S. Ezell. – 2022.
51. Independent Review of The Future of Compute: Final report and recommendations – GOV.UK [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gov.uk/government/publications/future-of-compute-review/the-future-of-compute-report-of-the-review-of-independent-panel-of-experts#chap1> (дата обращения: 21.06.2023).
 52. Highlights – June 2023 | TOP500 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.top500.org/lists/top500/2023/06/highs/> (дата обращения: 21.06.2023).
 53. A pro-innovation approach to AI regulation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gov.uk/government/publications/ai-regulation-a-pro-innovation-approach/white-paper> (дата обращения: 05.04.2023).
 54. India evolving as frontrunner in high power computing | Department Of Science & Technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://dst.gov.in/india-evolving-frontrunner-high-power-computing> (дата обращения: 21.06.2023).
 55. National Supercomputing Mission (NSM) | IBEF [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ibef.org/blogs/national-supercomputing-mission-nsm> (дата обращения: 21.06.2023).
 56. Prime Minister's meeting with President of the United States of America [Электронный ресурс]. – URL: <https://pib.gov.in/PressReleaseDetailm.aspx?PRID=1827885> (дата обращения: 21.06.2023).
 57. House T.W. FACT SHEET: United States and India Elevate Strategic Partnership with the initiative on Critical and Emerging Technology (iCET) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/01/31/fact-sheet-united-states-and-india-elevate-strategic-partnership-with-the-initiative-on-critical-and-emerging-technology-icet/> (дата обращения: 21.06.2023).
 58. High End Computing (HEC) Software Sustainability Efforts: Examples of Federal Activities – Catalog [Электронный ресурс]. – URL: <https://catalog.data.gov/no/dataset/high-end-computing-hec-software-sustainability-efforts> (дата обращения: 21.06.2023).
 59. Critical and Emerging Technologies List Update.
 60. Инвестиции в периферийные вычисления MEC вырастут втрое к 2025 году [Электронный ресурс]. – URL: <https://clck.ru/VDQNY> (дата обращения: 15.06.2023).
 61. At The Edge: Why Multi-Access Edge Computing Is The Future [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.henkel-adhesives.com/at/en/spotlights/all-spotlights/new-developments/why-multi-access-edge-computing-is-the-future.html> (дата обращения: 21.06.2023).
 62. Notice of the Networking and Information Technology Research and Development Program 30th Anniversary Symposium [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2022/04/08/2022-07500/notice-of-the-networking-and-information-technology-research-and-development-program-30th> (дата обращения: 21.06.2023).
 63. Future Advanced Computing Ecosystem Strategic Plan FY2022 Implementation Roadmap. FACE Strategic Plan FY22 Implementation Roadmap. – 2022.
 64. HPC4EnergyInnovation (HPC4EI) [Электронный ресурс]. – URL: <https://hpc4energyinnovation.llnl.gov/> (дата обращения: 21.06.2023).
 65. HPC4EnergyInnovation Program: Collaborations for U.S. Manufacturers [Электронный ресурс]. – URL: https://hpc4energyinnovation.llnl.gov/sites/hpc4energyinnovation/files/2022-11/HPC4EI_Solicitation_Fall_2022_LLNL-MI-840827_v2.pdf (дата обращения: 21.06.2023).

66. Ford receives DOE HPC4Mfg award to optimize process for electrode drying in battery manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.greencar-congress.com/2023/01/20230119-ford.html> (дата обращения: 21.06.2023).
67. Advanced Scientific Computing Research | Department of Energy [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.energy.gov/science/ascr/advanced-scientific-computing-research> (дата обращения: 21.06.2023).
68. Exascale Computing Project [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lanl.gov/projects/exascale-computing-project/index.php> (дата обращения: 19.06.2023).
69. DOE ASCR Selects Seed Collaborations for Software Sustainability [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/doe-ascr-selects-seed-collaborations-for-software-sustainability/> (дата обращения: 21.06.2023).
70. China's grand plan for a world-beating digital future - Asia Times [Электронный ресурс]. – URL: <https://asiatimes.com/2023/03/chinas-grand-plan-for-a-world-beating-digital-future/> (дата обращения: 19.06.2023).
71. China calls for faster push into 5G, IoT and supercomputing engines of growth in new grand digitalisation plan | South China Morning Post [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.scmp.com/tech/article/3211738/china-unveils-grand-digitalisation-plan-calling-accelerated-push-5g-iot-and-supercomputing-engines> (дата обращения: 19.06.2023).
72. Nation to build up supercomputing capacities [Электронный ресурс]. – URL: https://english.www.gov.cn/policies/policywatch/202304/19/content_WS643f40fcc6d03ffcca6ec741.html (дата обращения: 21.06.2023).
73. China Accelerates Supercomputing Ecosystem - OpenGov Asia. – 2023.
74. Discover EuroHPC JU [Электронный ресурс]. – URL: https://eurohpc-ju.europa.eu/about/discover-eurohpc-ju_en (дата обращения: 19.06.2023).
75. etp4hpc. European HPC Effort | etp4hpc [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.etp4hpc.eu/euexascale.html> (дата обращения: 19.06.2023).
76. The European High Performance Computing Joint Undertaking | Shaping Europe's digital future [Электронный ресурс]. – URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/high-performance-computing-joint-undertaking> (дата обращения: 21.06.2023).
77. etp4hpc. The European Technology Platform for High Performance Computing [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.etp4hpc.eu/who-we-are.html> (дата обращения: 19.06.2023).
78. The European Processor Initiative (EPI) [Электронный ресурс]. – URL: https://eurohpc-ju.europa.eu/research-innovation-0/our-projects/european-processor-initiative-epi_en (дата обращения: 21.06.2023).
79. The Projects – EuroCC ACCESS [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eurocc-access.eu/about-us/the-projects/> (дата обращения: 19.06.2023).
80. EuroHPC Announces New Call Supporting EU-Japan Partnership [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/eurohpc-announces-new-call-supporting-eu-japan-partnership/> (дата обращения: 19.06.2023).
81. EuroHPC International Cooperation (HORIZON-EUROHPC-JU-2022-INCO-04) [Электронный ресурс]. – URL: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-eurohpc-ju-2022-inco-04-01> (дата обращения: 19.06.2023).

82. Fugaku continues to achieve top rankings (May 2023) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.r-ccs.riken.jp/en/outreach/topics/20230522-2/> (дата обращения: 21.06.2023).
83. Overview of HPCI | HPCI [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hpci-office.jp/en/about_hpci/what_is_hpci (дата обращения: 19.06.2023).
84. Project Screening Committee and Selection Committee | HPCI [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hpci-office.jp/en/about_hpci/selection_and_committee (дата обращения: 21.06.2023).
85. НИКС: Национальная исследовательская компьютерная сеть России - Официально [Электронный ресурс]. – URL: <https://niks.su/about> (дата обращения: 19.06.2023).
86. Перечень поручений по итогам встречи с представителями общественности в Череповце • Президент России [Электронный ресурс]. – URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/63196> (дата обращения: 15.06.2023).
87. Дмитрий Чернышенко: Крупнейшие суперкомпьютеры России объединят в единую сеть [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/news/43339/> (дата обращения: 15.06.2023).
88. Первые испытания объединенной суперкомпьютерной сети прошли успешно [Электронный ресурс]. – URL: https://www.spbstu.ru/media/news/nauka_i_innovatsii/pervye-ispytaniya-obedinennoy-superkompyuternoy-seti-proshli-uspeshno/ (дата обращения: 15.06.2023).
89. Доклад о реализации Плана деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на период с 2019 по 2024 год за 2019 год (утвержден 27.02.2020).
90. Как будет развиваться суперкомпьютерная инфраструктура для российской науки и образования [Электронный ресурс]. – URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/41633/> (дата обращения: 15.06.2023).
91. Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 г. № 166 [Электронный ресурс]. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/47688> (дата обращения: 15.06.2023).
92. Постановление Правительства Российской Федерации от 22.08.2022 № 1478 · Официальное опубликование правовых актов [Электронный ресурс]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208260051?index=1> (дата обращения: 15.06.2023).
93. О решениях по итогам конференции «Цифровая индустрия промышленной России» [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/orders/selection/401/45763/> (дата обращения: 15.05.2023).
94. По поручению Михаила Мишустина сформировано 35 промышленных центров компетенций по замещению зарубежных отраслевых цифровых продуктов и решений [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/news/45990/> (дата обращения: 15.06.2023).
95. ИЦК и ЦКР пособят в импортозамещении | Импортозамещение: новые возможности [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comnews.ru/projects/import-substitution/news/222059/ick-i-ckr-posobyat-importozameschenii> (дата обращения: 15.06.2023).
96. Белая книга цифровой экономики 2022 [Электронный ресурс]. – URL: https://files.data-economy.ru/Docs/White_Book.pdf (дата обращения: 15.06.2023).
97. BFM.ru. Максим Паршин: импортозамещение или даже импортоопережение в IT неизбежно [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bfm.ru/news/515672> (дата обращения: 15.06.2023).

- 15.06.2023).
98. Утверждены «дорожные карты» «Новое промышленное программное обеспечение» и «Новое общесистемное программное обеспечение» [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/news/47353/> (дата обращения: 15.06.2023).
 99. Правительство перезапускает соглашения с крупнейшими компаниями о развитии отдельных высокотехнологичных направлений | Министерство экономического развития Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo_perezapuskayet_soglasheniya_s_krupneyshimi_kompaniyami_o_razvitii_otdelnyh_vysokotekhnologichnyh_napravleniy.html (дата обращения: 15.06.2023).
 100. Подписано соглашение по дорожной карте «Новое промышленное программное обеспечение» [Электронный ресурс]. – URL: <https://rostec.ru/news/podpisano-soglashenie-po-dorozhnoy-karte-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie/> (дата обращения: 15.06.2023).
 101. Подписано соглашение по дорожной карте «Новое общесистемное программное обеспечение» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.company.rt.ru/press/news/d465543/> (дата обращения: 15.06.2023).
 102. В Правительстве подписаны соглашения о сотрудничестве по «дорожным картам» высокотехнологичных направлений [Электронный ресурс] : Официальный сайт Правительства РФ, 2022. – URL: <http://government.ru/news/47466/> (дата обращения: 29.12.2022).
 103. Утверждена «дорожная карта» по направлению «Новое промышленное программное обеспечение», реализуемая при координации Росатома [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2022/12/19/utverzhdena-dorozhnaya-karta-po-napravleniyu-novoe-industrialnoe-programmnoe-obespechenie-realizuemaya-pri-koordinatsii-rosatoma (дата обращения: 15.06.2023).
 104. Карта битов: промышленность хотят на 90% перевести на российский софт [Электронный ресурс]. – URL: <https://iz.ru/1453650/valerii-kodachigov/karta-bitov-promyshlennost-khotiat-na-90-perevesti-na-rossiiskii-soft> (дата обращения: 15.06.2023).
 105. Специалисты Передовой инженерной школы и Центра НТИ СПбПУ приняли участие в разработке дорожной карты «Новое промышленное программное обеспечение» [Электронный ресурс]. – URL: <http://technet-nti.ru/news/8394> (дата обращения: 15.06.2023).
 106. Михаил Мишустин принял участие в VIII конференции «Цифровая индустрия промышленной России» [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/news/48625/> (дата обращения: 15.06.2023).
 107. На ЦИПР-2023 Михаил Мишустин дал ряд поручений для достижения технологического суверенитета [Электронный ресурс]. – URL: <https://cipr.ru/news/na-cipr-2023-mihail-mishustin-dal-ryad-poruchenij-dlya-dostizheniya-tehnologicheskogo-suvereniteta/> (дата обращения: 15.06.2023).
 108. Japan to pay for half of \$100m generative AI supercomputer – Nikkei Asia [Электронный ресурс]. – URL: <https://asia.nikkei.com/Business/Technology/Japan-to-pay-for-half-of-100m-generative-AI-supercomputer> (дата обращения: 19.06.2023).
 109. TOP500 List – June 2023 | TOP500 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.top500.org/lists/top500/list/2023/06/> (дата обращения: 23.06.2023).
 110. From toys to human organs – the diversified world of 3D printing | IEC e-tech [Электронный ресурс]. – URL: <https://etech.iec.ch/issue/2017-05/from-toys-to-human-organs-the->

- diversified-world-of-3d-printing (дата обращения: 15.06.2023).
111. ISO/IEC JTC 1/SC 32 - Data management and interchange [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/committee/45342.html> (дата обращения: 10.06.2023).
 112. ISO/IEC JTC 1/SC 7 - Software and systems engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/committee/45086.html> (дата обращения: 10.06.2023).
 113. Overview of the SC 7 Standards Collection [Электронный ресурс]. – URL: <https://committee.iso.org/sites/jtc1sc7/home/projects/overview.html> (дата обращения: 10.06.2023).
 114. ISO/IEC JTC 1/SC 7 | Encyclopedia MDPI [Электронный ресурс]. – URL: <https://encyclopedia.pub/entry/27812> (дата обращения: 10.06.2023).
 115. ISO/IEC TS 24748-6:2016 - Systems and software engineering — Life cycle management — Part 6: System integration engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/66433.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 116. ISO/IEC TS 24748-6 Systems and software engineering — Life cycle management — Part 6: System integration engineering [Электронный ресурс]. – URL: https://webstore.iec.ch/preview/info_isoiec24748-6%7Bed1.0%7Den.pdf (дата обращения: 11.06.2023).
 117. ISO/IEC TS 24748-6:2016 Системная и программная инженерия. Менеджмент жизненного цикла. Часть 6. Инженерия в области интеграции системы - ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6261107> (дата обращения: 11.06.2023).
 118. ISO 10303-105:2019 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 105: Integrated application resource: Kinematics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/78589.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 119. ISO/TS 10303-439:2011 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 439: Application module: AP239 product life cycle support [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/60675.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 120. ISO/TS 10303-433:2011 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 433: Application module: AP233 systems engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/60674.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 121. ISO/IEC/IEEE 12207:2017 - Systems and software engineering — Software life cycle processes [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/63712.html?browse=tc> (дата обращения: 11.06.2023).
 122. ISO/IEC/IEEE 24748-1:2018 - Systems and software engineering — Life cycle management — Part 1: Guidelines for life cycle management [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/72896.html?browse=tc> (дата обращения: 11.06.2023).
 123. ISO 10303-239:2012 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 239: Application protocol: Product life cycle support [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/54791.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 124. ISO/IEC 13522-7:2001 - Information technology — Coding of multimedia and hypermedia information — Part 7: Interoperability and conformance testing for ISO/IEC 13522-5 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/29236.html> (дата обращения: 11.06.2023).

- 11.06.2023).
125. ISO/TS 10303-1288:2019 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1288: Application module: Management resource information [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/78629.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 126. ISO 10303-238:2022 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 238: Application protocol: Model based integrated manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/84898.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 127. ISO 10303-232:2002 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 232: Application protocol: Technical data packaging core information and exchange [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/27831.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 128. ISO/TS 10303-1760:2014 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1760: Application module: Pre defined product data management specializations [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/64489.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 129. ISO/TS 10303-1628:2022 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1628: Application module: Design product data management [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/84688.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 130. ISO/TS 10303-1231:2019 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1231: Application module: Product data management [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/79339.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 131. ISO 10303-108:2005 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 108: Integrated application resource: Parameterization and constraints for explicit geometric product models [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/34697.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 132. ISO 10303-112:2006 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 112: Integrated application resource: Modelling commands for the exchange of procedurally represented 2D CAD models [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/39581.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 133. ISO/IEC/IEEE 26511:2018 - Systems and software engineering — Requirements for managers of information for users of systems, software, and services [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/70879.html> (дата обращения: 11.06.2023).
 134. ISO/IEC/IEEE 29119-1:2022 - Software and systems engineering — Software testing — Part 1: General concepts [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/81291.html?browse=tc> (дата обращения: 12.06.2023).
 135. ISO 20242-4:2011 - Industrial automation systems and integration — Service interface for testing applications — Part 4: Device capability profile template [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/37240.html> (дата обращения: 12.06.2023).
 136. ISO 20242-3:2011 - Industrial automation systems and integration — Service interface for testing applications — Part 3: Virtual device service interface [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/37239.html> (дата обращения: 12.06.2023).

137. ISO/IEC 15909-1:2019 - Systems and software engineering — High-level Petri nets — Part 1: Concepts, definitions and graphical notation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/67235.html> (дата обращения: 12.06.2023).
138. ISO/IEC 26551:2016 - Software and systems engineering — Tools and methods for product line requirements engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/69530.html?browse=tc> (дата обращения: 12.06.2023).
139. ISO/IEC TR 19759:2015 - Software Engineering — Guide to the software engineering body of knowledge (SWEBOK) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/67604.html?browse=tc> (дата обращения: 12.06.2023).
140. ISO/IEC TR 19759:2015 Разработка программного обеспечения. Руководство к Своду Знаний по программной инженерии (SWEBOK) – ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6106115> (дата обращения: 12.06.2023).
141. IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology [Электронный ресурс]. – URL: http://www.informatik.htw-dresden.de/~hauptman/SEI/IEEE_Standard_Glossary_of_Software_Engineering_Terminology%20.pdf (дата обращения: 10.06.2023).
142. ISO/IEC 14102:2008 Информационные технологии. Руководство по оцениванию и выбору инструментальных CASE-средств – ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5302282> (дата обращения: 10.06.2023).
143. ISO/IEC 14102:2008 - Information technology — Guideline for the evaluation and selection of CASE tools [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/43189.html> (дата обращения: 10.06.2023).
144. ISO/IEC TR 24766:2009 - Information technology — Systems and software engineering — Guide for requirements engineering tool capabilities [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/51041.html?browse=tc> (дата обращения: 10.06.2023).
145. ISO/IEC TR 14471:2007 | IEC Webstore [Электронный ресурс]. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/9919> (дата обращения: 10.06.2023).
146. IEC 61360-1:2017 | IEC Webstore [Электронный ресурс]. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/28560> (дата обращения: 10.06.2023).
147. ISO 17359:2018 - Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/71194.html> (дата обращения: 11.06.2023).
148. ISO 15531-44:2017 - Industrial automation systems and integration — Industrial manufacturing management data — Part 44: Information modelling for shop floor data acquisition [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/71064.html> (дата обращения: 11.06.2023).
149. ISO/IEC 2382:2015 - Information technology — Vocabulary [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/63598.html> (дата обращения: 11.06.2023).
150. ISO - 35.240.10 - Computer-aided design (CAD) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/ics/35.240.10/x/> (дата обращения: 10.06.2023).
151. ISO 10303-1:2021 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/72237.html> (дата обращения: 10.06.2023).

152. ISO 15531-1:2004 - Industrial automation systems and integration — Industrial manufacturing management data — Part 1: General overview [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/28144.html> (дата обращения: 10.06.2023).
153. ISO 15746-1:2015 - Automation systems and integration — Integration of advanced process control and optimization capabilities for manufacturing systems — Part 1: Framework and functional model [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/61131.html> (дата обращения: 10.06.2023).
154. ISO/DIS 10303-1 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/83105.html> (дата обращения: 10.06.2023).
155. ISO/TR 3151-1 - Visualization elements of PLM-MES interface — Part 1: Overview [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/84703.html> (дата обращения: 10.06.2023).
156. ISO/CD 3151-2 - Visualization elements of PLM-MES interface — Part 2: 3D error feedback in the plant industry [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/84702.html> (дата обращения: 10.06.2023).
157. ISO/DTS 15926-4 - Industrial automation systems and integration — Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities — Part 4: Initial reference data [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/81270.html> (дата обращения: 10.06.2023).
158. ISO/TS 13399-201:2014 - Cutting tool data representation and exchange — Part 201: Creation and exchange of 3D models — Regular inserts [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/60417.html> (дата обращения: 10.06.2023).
159. ISO 14306:2017 - Industrial automation systems and integration — JT file format specification for 3D visualization [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/62770.html> (дата обращения: 10.06.2023).
160. ISO 25297-1:2012 - Optics and photonics — Electronic exchange of optical data — Part 1: NODIF information model [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/60265.html> (дата обращения: 10.06.2023).
161. ISO/ASTM TR 52906:2022 - Additive manufacturing — Non-destructive testing — Intentionally seeding flaws in metallic parts [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/75716.html> (дата обращения: 10.06.2023).
162. ISO 23247-1:2021 - Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/75066.html> (дата обращения: 10.06.2023).
163. IEC 62832-1:2020 - Industrial-process measurement, control and automation - Digital factory [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/cfef54c6-c080-4e1d-980a-a7d53a784409/iec-62832-1-2020> (дата обращения: 10.06.2023).
164. ISO 23247-2:2021 - Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 2: Reference architecture [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/78743.html> (дата обращения: 10.06.2023).
165. DS/ISO/IEC 26550 - Software and systems engineering - Reference model for product line engineering and management | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/9982696/ds-iso-iec-26550> (дата обращения: 10.06.2023).

166. BS EN 9300-200: Aerospace series. LOTAR. LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data - Common Concepts for LOng Term Archiving and Retrieval of Product Structure Information [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bsbedge.com/productdetails/BSI/BSI30329131/bsen9300-200> (дата обращения: 12.06.2023).
167. BS EN 9300-115:2018 Aerospace series. LOTAR. LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data Explicit CAD assembly structure - European Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-9300-115-2018-aerospace-series-lotar-long-term-archiving-and-retrieval-of-digital-technical-product-documentation-such-as-3d-cad-and-pdm-data-explicit-cad-assembly-structure/> (дата обращения: 12.06.2023).
168. BS EN 9300-010:2018 Aerospace series. LOTAR. LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data Overview Data Flow - European Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-9300-010-2018-aerospace-series-lotar-long-term-archiving-and-retrieval-of-digital-technical-product-documentation-such-as-3d-cad-and-pdm-data-overview-data-flow/> (дата обращения: 12.06.2023).
169. CEN EN 9300-010:2018 - Aerospace series - LOTAR - LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6ca313cc-92a5-40e2-92cd-10ea1ee6a24f/en-9300-010-2018> (дата обращения: 12.06.2023).
170. ISO/TS 10303-1231:2008 | 15 Dec 2008 | BSI Knowledge [Электронный ресурс]. – URL: <https://knowledge.bsigroup.com/products/industrial-automation-systems-and-integration-product-data-representation-and-exchange-part-1231-application-module-product-data-management/standard> (дата обращения: 12.06.2023).
171. BS EN ISO 13567-1:2017 Technical product documentation. Organization and naming of layers for CAD Overview and principles - European Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.en-standard.eu/bs-en-iso-13567-1-2017-technical-product-documentation-organization-and-naming-of-layers-for-cad-overview-and-principles/> (дата обращения: 12.06.2023).
172. NBSIR 76-1094 (R) Standards for Computer Aided Manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir76-1094e2.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
173. AFML-TR-77-145 Standards for Computer Aided Manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir76-1183.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
174. Standards for computer aided manufacturing: Evans, John M., Jr.: Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive [Электронный ресурс]. – URL: https://archive.org/details/standardsforcom7610evan_0 (дата обращения: 14.06.2023).
175. NBSIR 83-2671 The Standards Interface for Computer-Aided Design [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.govinfo.gov/app/details/GOVPUB-C13-137f6169cd0488d815a49ba050e09225> (дата обращения: 14.06.2023).
176. Integration Definition for Function Modeling (IDEFO) [Электронный ресурс]. – URL: <https://advanced-quality-tools.ru/assets/idef0-eng.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
177. IDEF Knowledge Base [Электронный ресурс]. – URL:

- <https://idefregistry.edufoundation.kantarainitiative.org/idef-knowledge-base/> (дата обращения: 14.06.2023).
178. The IDEF Registry: an open invite to commit to trusted digital identity solutions | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/blogs/cybersecurity-insights/idef-registry-open-invite-commit-trusted-digital-identity-solutions> (дата обращения: 14.06.2023).
 179. Fourth and goal: closing in on the Identity Ecosystem Framework | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/blogs/cybersecurity-insights/fourth-and-goal-closing-identity-ecosystem-framework> (дата обращения: 14.06.2023).
 180. Circular Economy: A Product Life Cycle Perspective on Engineering and Manufacturing Practices | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/circular-economy-product-life-cycle-perspective-engineering-and-manufacturing-practices> (дата обращения: 14.06.2023).
 181. A major NSTIC milestone: IDEFv1 set for October 20th public release | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/blogs/cybersecurity-insights/major-nstic-milestone-idefv1-set-october-20th-public-release> (дата обращения: 14.06.2023).
 182. Breaking news: the IDEFv1 is now available to the public! | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/blogs/cybersecurity-insights/breaking-news-idefv1-now-available-public> (дата обращения: 14.06.2023).
 183. NIST Special Publication 800-27 Engineering Principles for Information Technology Security (A Baseline for Achieving Security) [Электронный ресурс]. – URL: <https://csrc.nist.gov/external/nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-27.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
 184. The Role of Standards in Product Lifecycle Management Support | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/role-standards-product-lifecycle-management-support> (дата обращения: 14.06.2023).
 185. NISTIR 7289 The Role of Standards in Product Lifecycle Management Support [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-12fcfc0e0c6e204e7edaf0bf8c0a6b0/pdf/GOVPUB-C13-12fcfc0e0c6e204e7edaf0bf8c0a6b0.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
 186. NISTIR 7339 Analysis of Standards for Lifecycle Management of Systems for US Army - a preliminary investigation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-d6838e510a2d60763b44d384b4da9a2e/pdf/GOVPUB-C13-d6838e510a2d60763b44d384b4da9a2e.pdf> (дата обращения: 14.06.2023).
 187. Secure Software Development Framework (SSDF) Version 1.1: Recommendations for Mitigating the Risk of Software Vulnerabilities | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/secure-software-development-framework-ssdf-version-11-recommendations-mitigating-risk> (дата обращения: 14.06.2023).
 188. Flexible Software for Rigorous Simulations of Magnetic Particle Imaging Systems | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/flexible-software-rigorous-simulations-magnetic-particle-imaging-systems> (дата обращения: 14.06.2023).
 189. Assessment of Different Approaches for Measuring Shear Fracture Appearance in Charpy Tests | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/assessment-different-approaches-measuring-shear-fracture-appearance-charpy-tests> (дата обращения: 14.06.2023).
 190. Architecture Definition in Complex System Design Using Model Theory | NIST [Электронный

- ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/architecture-definition-complex-system-design-using-model-theory> (дата обращения: 14.06.2023).
191. GB/T 36475-2018 Classification of software product [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT36475-2018> (дата обращения: 15.06.2023).
 192. DL 5026-1993 Technical regulation for computer aided design of power engineering [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=DL%205026-1993 (дата обращения: 15.06.2023).
 193. GB/T 15751-1995 Technical product documentation--Requirements for computer aided design and drafting--Vocabulary [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2015751-1995 (дата обращения: 15.06.2023).
 194. GB/T 14213-2008 The initial graphics exchange specification [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT14213-2008> (дата обращения: 15.06.2023).
 195. GB/T 26789-2011 Product lifecycle management services specification [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2026789-2011 (дата обращения: 15.06.2023).
 196. GB/T 33222-2016 Common technical specifications of PLM for mechanical products [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2033222-2016 (дата обращения: 15.06.2023).
 197. GB/T 35119-2017 Specification for data management in product lifecycle [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2035119-2017 (дата обращения: 15.06.2023).
 198. DA/T 88-2021 Product data management (PDM) system electronic file filing and electronic file management specification [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=DA/T%2088-2021 (дата обращения: 15.06.2023).
 199. GB/Z 18727-2002 Enterprise application PDM implementing specification [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/Z%2018727-2002 (дата обращения: 15.06.2023).
 200. GB/T 31054-2014 Computer aided engineering for mechanical products — Finite element numerical calculation — Terminology [Электронный ресурс]. – URL: https://gbstandards.org/China_standard_english.asp?code=GB/T%2031054-2014 (дата обращения: 15.06.2023).
 201. GB/T 36341.3-2018 Information technology - Information presentation of shape modeling - Part 3: Streaming transmission [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT36341.3-2018> (дата обращения: 15.06.2023).
 202. Утверждена программа национальной стандартизации на 2023 год [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/8782> (дата обращения: 05.06.2023).
 203. Стандартизация систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://sert-service.ru/standartizatsiya-sistem-avtomatizirovannogo-proyektirovaniya/> (дата обращения: 05.06.2023).

204. Шикина В.Е. Техническая документация информационных систем / В.Е. Шикина. – УлГТУ. – Ульяновск, 2018. – 92 с.
205. Приказ №151 от 26.01.2023 «О закреплении документов национальной системы стандартизации за техническим комитетом по стандартизации „Информационные технологии“ (ТК 022)» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/406443> (дата обращения: 05.06.2023).
206. Технический комитет по стандартизации ТК 700 [Электронный ресурс]. – URL: <https://vniief.ru/researchdirections/TK700/> (дата обращения: 05.06.2023).
207. Перечень действующих национальных стандартов, разработанных ТК 700 [Электронный ресурс]. – URL: <https://vniief.ru/researchdirections/TK700/1b493000458b120cbfc8bf3a2e03dfb7> (дата обращения: 05.06.2023).
208. 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)» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/346676> (дата обращения: 05.06.2023).
209. ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928>.
210. Компьютерное моделирование с учетом положений российских национальных стандартов в совместных российско-китайских проектах [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1//8956> (дата обращения: 05.06.2023).
211. Новый этап развития стандартизации в строительстве [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1//8525> (дата обращения: 05.06.2023).
212. Росстандарт создал ТК 165 «САПР электроники» на базе ООО «НИИ «АСОНИКА» | АСОНИКА [Электронный ресурс]. – URL: <https://asonika-online.ru/news/431/> (дата обращения: 06.06.2023).
213. Впервые создаётся дорожная карта развития «САПР электроники выше мирового уровня» | АСОНИКА [Электронный ресурс]. – URL: <https://asonika-online.ru/news/420/> (дата обращения: 06.06.2023).
214. ТК 165 Разработка стандартов [Электронный ресурс]. – URL: <https://asonika-online.ru/tk165-standard-development/> (дата обращения: 06.06.2023).
215. ГОСТ Р 70201-2022 Системы автоматизированного проектирования электроники. Оптимальное сочетание натурных и виртуальных испытаний электроники на надежность и внешние воздействующие факторы. Требования и порядок проведения при выполнении технического задания на НИОКР [Электронный ресурс]. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=4&month=7&year=2022&search=&id=245441> (дата обращения: 06.06.2023).
216. Управление жизненным циклом высокотехнологичной продукции на основе национальных стандартов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1//7753> (дата обращения: 06.06.2023).
217. Приказ №3370 от 30.12.2022 «О закреплении документов национальной системы

- стандартизации за техническим комитетом по стандартизации „Поддержка жизненного цикла продукции“ (ТК 482)» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/397281> (дата обращения: 06.06.2023).
218. Опубликованные стандарты | Технический комитет по стандартизации ТК 482 [Электронный ресурс]. – URL: <https://tk482.ru/ndocs> (дата обращения: 06.06.2023).
 219. Технический комитет ТК 459 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий» - ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/pages/Standardization/tk459> (дата обращения: 06.06.2023).
 220. Приказ №3364 от 30.12.2022 «О закреплении документов национальной системы стандартизации за техническим комитетом по стандартизации „Информационная поддержка жизненного цикла изделий“ (ТК 459)» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/397267> (дата обращения: 06.06.2023).
 221. В России разработали концепцию национальной суперкомпьютерной инфраструктуры - Наука - ТАСС [Электронный ресурс]. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/8309573> (дата обращения: 15.06.2023).
 222. Конференция ЦИПР 2023. Комплексный подход в разработке систем анализа и инженерных расчетов (CAE) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=MeM5Bwk6X_Q (дата обращения: 16.06.2023).
 223. Как попасть на биржу? Все о листинге ценных бумаг [Электронный ресурс]. – URL: <https://quote.rbc.ru/news/article/62823bbb9a794706b4ebfa30> (дата обращения: 25.05.2023).
 224. Advanced Manufacturing Technology | Q3 2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.drakestar.com/research/advanced-manufacturing-technology-q3-2022> (дата обращения: 25.05.2023).
 225. Siemens Digital Industries Software | Siemens Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sw.siemens.com/en-US/> (дата обращения: 25.05.2023).
 226. Siemens Teamcenter commands 26.31% market share in Product Lifecycle Management (PLM) [Электронный ресурс]. – URL: <https://enlyft.com/tech/products/siemens-teamcenter> (дата обращения: 25.05.2023).
 227. Siemens NX commands 1.01% market share in Computer-aided Design & Engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://enlyft.com/tech/products/siemens-nx> (дата обращения: 01.06.2023).
 228. Altair – Software Produkte | Flow Numerics [Электронный ресурс]. – URL: <https://flownumerics.com/en/altair/> (дата обращения: 25.05.2023).
 229. Top 5 products in the Computer-aided Design & Engineering market [Электронный ресурс]. – URL: <https://enlyft.com/techComputer-aided Design & Engineering> (дата обращения: 01.06.2023).
 230. Altair Inspire [Электронный ресурс]. – URL: <https://hyperworks.compmechlab.ru/article/altair-solidthinking-inspire> (дата обращения: 25.05.2023).
 231. Altair. Altair Presents Open, Flexible, and Scalable Total Digital Twin Solution [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/altair-presents-open-flexible-and-scalable-total-digital-twin-solution-301639251.html> (дата обращения: 07.06.2023).

232. Altair. Altair Releases Altair SimSolid Cloud [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/altair-releases-altair-simsolid-cloud-301805701.html> (дата обращения: 25.05.2023).
233. Altair SimSolid | Расчет прочности конструкций [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.elm-c.ru/altair-simsolid> (дата обращения: 25.05.2023).
234. Altair annual report 2021 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/a/NASDAQ_ALTR_2021.pdf (дата обращения: 25.05.2023).
235. ANSYS annual report 2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://investors.ansys.com/static-files/90abb39f-75e6-4aee-891d-fa31bbdf8660> (дата обращения: 25.05.2023).
236. Engineering Simulation Software | Ansys Products [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/products> (дата обращения: 14.03.2023).
237. Ansys Twin Builder | Create and Deploy Digital Twin Models [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder> (дата обращения: 25.05.2023).
238. Autodesk Annual Report 2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://investors.autodesk.com/static-files/3ac5fc36-9b68-4f58-9794-51157a543567> (дата обращения: 25.05.2023).
239. Autodesk | 3D Design, Engineering & Construction Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autodesk.com/> (дата обращения: 25.05.2023).
240. Autodesk annual report 2021 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/a/NASDAQ_ADSK_2021.pdf (дата обращения: 25.05.2023).
241. Dassault Systèmes corporate report 2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://investor.3ds.com/static-files/613d4b4c-1982-4a16-91b3-4ff4948d53c2> (дата обращения: 25.05.2023).
242. Discover the Latest Products Offered | Dassault Systèmes [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.3ds.com/products> (дата обращения: 25.05.2023).
243. Shape the world we live in | CATIA – Dassault Systèmes [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.3ds.com/products-services/catia/> (дата обращения: 26.05.2023).
244. Transform Your Business with 3DEXPERIENCE Platform | Dassault Systèmes [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.3ds.com/3dexperience> (дата обращения: 26.05.2023).
245. Company | Hexagon [Электронный ресурс]. – URL: <https://hexagon.com/company> (дата обращения: 25.05.2023).
246. Completion of Hexagon's acquisition of MSC Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.e-xstream.com/news/completion-hexagons-acquisition-msc-software> (дата обращения: 26.05.2023).
247. Computer-Aided Engineering & CAE software | Hexagon [Электронный ресурс]. – URL: <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software> (дата обращения: 26.05.2023).
248. Multiphysics simulation software | Hexagon [Электронный ресурс]. – URL: <https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/multiphysics-simulation-software> (дата обращения: 25.05.2023).

249. Hexagon annual report 2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://vp208.alertir.com/afw/files/press/hexagon/202303301517-1.pdf> (дата обращения: 26.05.2023).
250. PTC annual report 2022 [Электронный ресурс]. – URL: https://s27.q4cdn.com/610238322/files/doc_financials/2022/ar/2022-Annual-Report.pdf (дата обращения: 26.05.2023).
251. Windchill Product Lifecycle Management (PLM) Software | Enterprise PLM System | PTC [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ptc.com/en/products/windchill> (дата обращения: 26.05.2023).
252. 3 Great Foreign Companies to Invest in Right Now | Nasdaq [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nasdaq.com/articles/3-great-foreign-companies-to-invest-in-right-now-8> (дата обращения: 26.05.2023).
253. PTC Products | PTC [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ptc.com/en/products> (дата обращения: 25.05.2023).
254. PTC Annual report 2020 [Электронный ресурс]. – URL: https://s27.q4cdn.com/610238322/files/doc_financials/2020/ar/2020_PTC_Annual_Report.pdf (дата обращения: 26.05.2023).
255. Siemens Report FY 2022 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.siemens.com/applications/b09c49eb-3a14-73b3-9f71-e30e3c2dfdbd/s3_assets/pdfs/en/Siemens_Report_FY2022.pdf?ste_sid=9dc11a5d105b59facaa4f8d02f9b337f (дата обращения: 25.05.2023).
256. Siemens raises sales and profit outlook after strong start to 2023 | Reuters [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.reuters.com/technology/siemens-raised-full-year-sales-guidance-after-q1-beats-forecasts-2023-02-08/> (дата обращения: 25.05.2023).
257. Earnings Release and Financial Results Q2 FY 2023 | Press | Company | Siemens [Электронный ресурс]. – URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/earnings-release-and-financial-results-q2-fy-2023> (дата обращения: 25.05.2023).
258. PLM after 20 years – What is the position of Siemens Digital Industries Software today? [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.industrie-digitalisierung.com/en/plm-after-20-years-what-is-the-position-of-siemens-digital-industries-software-today/> (дата обращения: 25.05.2023).
259. Игореvич М.С. Понятие бизнес-модели: сущность, типология и основные принципы построения / М.С. Игореvич, Б.А. Владимирович // Экономика Профессия Бизнес. – 2016. – № 1. – С. 24-30.
260. Software Business Models [Электронный ресурс] : , Examples, Revenue Streams, and Characteristics for Products, Services, and Platforms. / AltexSoft. – 2018. – URL: <https://www.altexsoft.com/blog/business/software-business-models-examples-revenue-streams-and-characteristics-for-products-services-and-platforms/> (дата обращения: 26.06.2023).
261. Yaskovich A. Software Business Models: What Works for Your Product? [Электронный ресурс] : Software Distribution strategies. / ScienceSoft. – 2019. – URL: <https://www.scnsoft.com/blog/software-business-models-explained> (дата обращения: 26.06.2023).
262. Software Business Models, Examples, Revenue Streams, and Characteristics for Products, Services, and Platforms [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.altexsoft.com/blog/business/software-business-models-examples-revenue-streams-and-characteristics-for->

- products-services-and-platforms/ (дата обращения: 30.06.2023).
263. All-in Always-on [Электронный ресурс] : Altair Unit. / Altair. – 2023. – URL: <https://altair.com/altair-units>.
 264. Altair Units Licensing System [Электронный ресурс]. – URL: <https://altair.com/altair-units> (дата обращения: 30.06.2023).
 265. Уникальная система лицензирования Altair [Электронный ресурс]. – URL: <https://hyperworks.compmechlab.ru/article/sistema-licenzirovaniya> (дата обращения: 30.06.2023).
 266. Altair Partner Alliance [Электронный ресурс]. – URL: https://altair.com/docs/default-source/resource-library/apa_overview_brochure_web_121922f1210ca1-197a-436a-8677-b6ce94b2aff6.pdf.
 267. Федеральный закон от 25.02.1999 N 39-ФЗ (ред. от 28.12.2022) «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений» [Электронный ресурс] : Статья 1. Основные понятия. – КонсультантПлюс, 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22142/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/ (дата обращения: 29.06.2023).
 268. Ansys Annual Report [Электронный ресурс] : Financial report 2022. / Ansys. – 2023. – URL: <https://investors.ansys.com/static-files/90abb39f-75e6-4aee-891d-fa31bbdf8660> (дата обращения: 27.06.2023).
 269. Autodesk Annual Report [Электронный ресурс] : Financial report 2022. / Autodesk. – 2023. – URL: <https://investors.autodesk.com/static-files/3ac5fc36-9b68-4f58-9794-51157a543567> (дата обращения: 27.06.2023).
 270. PTC Annual Report [Электронный ресурс] : Financial report 2022. / PTC. – 2023. – URL: https://s27.q4cdn.com/610238322/files/doc_financials/2022/ar/2022-Annual-Report.pdf (дата обращения: 27.06.2023).
 271. Dassault Systemes Annual Report [Электронный ресурс] : Financial report 2022. / Dassault Report. – 2023. – URL: <https://investor.3ds.com/static-files/d9a277b2-53aa-4a7c-baec-6ee1d79a9d0e> (дата обращения: 27.06.2023).
 272. Hexagon Annual Report [Электронный ресурс] : Financial report 2022. / Hexagon. – 2023. – URL: <https://vp208.alertir.com/afw/files/press/hexagon/202303301517-1.pdf> (дата обращения: 27.06.2023).
 273. Altair Announces Fourth Quarter [Электронный ресурс] : Full Year 2022 Financial Results. / Altair. – 2023. – URL: <https://investor.altair.com/news-releases/news-release-details/altair-announces-fourth-quarter-and-full-year-2022-financial> (дата обращения: 27.06.2023).
 274. Siemens Annual Report [Электронный ресурс] : Financial report 2022. / Siemens. – 2023. – URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:c1088e4f-4d7f-4fa5-8e8e-33398ecf5361/sustainability-report-fy2022.pdf> (дата обращения: 27.06.2023).
 275. Слияния и поглощения [Электронный ресурс] : Материалы из свободной энциклопедии. – Википедия, 2023. – URL: <https://clck.ru/34u9XX> (дата обращения: 29.06.2023).
 276. Altair Expands Electronic System Design Technology [Электронный ресурс] : with Acquisition of Concept Engineering. / Altair. – 2022. – URL: <https://altair.com/newsroom/news-releases/altair-expands-electronic-system-design-technology-with-acquisition-of-concept-engineering> (дата обращения: 29.06.2023).
 277. Acquisitions & Partnerships [Электронный ресурс] : Key Drivers to enhance product portfolio,

- grow talent pool and expand our ecosystem. / Ansys. – 2023. – URL: <https://investors.ansys.com/company-information/acquisitions-and-partnerships/> (дата обращения: 30.06.2023).
278. Autodesk to Acquire The Wild [Электронный ресурс] : Extended Reality (XR) Solutions Provider for Immersive and Collaborative Workspaces for Design and Construction. / Autodesk. – 2022. – URL: <https://adsknews.autodesk.com/en/news/autodesk-acquires-the-wild/> (дата обращения: 30.06.2023).
 279. DELMIA Augmented Experience [Электронный ресурс] : Leverage Augmented Reality to Improve Productivity. / Dassault Systemes. – 2023. – URL: <https://www.3ds.com/products/delmia/augmented-experience> (дата обращения: 30.06.2023).
 280. AVVIR joins Hexagon strengthening Hexagons ability to intelligently power [Электронный ресурс] : the construction industry with Smart Digital Realities™. / Hexagon. – 2022. – URL: <https://hexagon.com/company/newsroom/press-releases/2022/avvir-joins-hexagon-strengthening-hexagons-ability-to-intelligently-power-the-construction-industry-with-smart-digital-realities> (дата обращения: 30.06.2023).
 281. Hexagon completes acquisition ETQ [Электронный ресурс] : Transaction details. / Hexagon. – 2022. – URL: <https://hexagon.com/company/newsroom/press-releases/2022/hexagon-completes-acquisition-etq> (дата обращения: 30.06.2023).
 282. PTC to Acquire Intland Software [Электронный ресурс] : PTC has signed a definitive agreement. / PTC. – 2022. – URL: <https://www.ptc.com/en/about/intland-software> (дата обращения: 30.06.2023).
 283. PTC Acquires Leading SaaS Field Service Management Provider ServiceMax [Электронный ресурс] : PTC completes acquisition of ServiceMax. / PTC. – 2022. – URL: <https://www.ptc.com/en/news/2023/ptc-acquires-servicemax> (дата обращения: 30.06.2023).
 284. Siemens Partners with Hyundai Motor Company and Kia Corporation [Электронный ресурс] : for Digital Mobility Transformation. / Siemens Digital Industries Software. – 2021. – URL: <https://newsroom.sw.siemens.com/en-US/siemens-hyundai-kia-xcelerator-digital-twin/> (дата обращения: 27.06.2023).
 285. Ansys Announces Strategic Collaboration With AWS [Электронный ресурс] : Engineering simulation solutions provider partners with cloud services provider to develop Ansys Gateway powered by AWS for cloud-based simulation. / Digital Engineering. – 2022. – URL: <https://www.digitalengineering247.com/article/ansys-announces-strategic-collaboration-with-aws> (дата обращения: 27.06.2023).
 286. ITC Infotech and PTC Create One of the Industry's Largest Organisations [Электронный ресурс] : Windchill Services Expertise with Expanded Alliance. / PTC. – 2022. – URL: <https://www.ptc.com/en/news/2022/ptc-itc-infotech-expanded-alliance-windchill-service-expertise> (дата обращения: 27.06.2023).
 287. TeamViewer and Siemens to innovate in the Product Lifecycle Management [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.teamviewer.com/en/company/press/teamviewer-and-siemens-to-innovate-in-the-product-lifecycle-management-space-with-augmented-and-mixed-reality-solutions/> (дата обращения: 27.06.2023).
 288. Dassault Systèmes and DXC Technology announce [Электронный ресурс] : partnership in Latin America. / Intelligent Cio. – 2022. – URL: <https://www.intelligentcio.com/latam/2022/11/01/dassault-systemes-and-dxc-technology-announce->

- partnership-in-latin-america/ (дата обращения: 27.06.2023).
289. 2022: QTIC partners with Siemens & OnePLM for startup support [Электронный ресурс] : Temple Quarter Enterprise Campus. / Bristol. – 2022. // Last Modified: 2022-12-02. – URL: <https://www.bristol.ac.uk/temple-quarter-campus/research-teaching-and-partnerships/qtic/news/2022/qtic-partners-with-siemens--oneplm-for-startup-support.html> (дата обращения: 27.06.2023).
 290. Grealou L. A Third Go at an SAP and Siemens Teamcenter Integration [Электронный ресурс] : Catching up on the December 2022 update release. / Engineering.com. – 2023. – URL: <https://www.engineering.com/story/a-third-go-at-an-sap-and-siemens-teamcenter-integration> (дата обращения: 27.06.2023).
 291. White N. Connecting Cloud-Native CAD, PDM, and PLM With One Button [Электронный ресурс] : PTC has introduced a seamless connection. / PTC. – 2022. – URL: <https://www.ptc.com/en/blogs/corporate/connecting-cloud-native-cad-pdm-plm-with-one-button> (дата обращения: 29.06.2023).
 292. Jonnalagadda S. Connecting the factory is now more critical than ever [Электронный ресурс] : The past few years have posed incredible challenges for manufacturers. / Autodesk. – 2022. – URL: <https://adsknews.autodesk.com/en/news/connected-factory-momentum-2-22/> (дата обращения: 29.06.2023).
 293. Dassault Systèmes, the H. HARTMANN Institute and the Institute Rafaël Launch the VORTHEx Project [Электронный ресурс] : the World's First 3D Simulator for Radiotherapy. / Dassault Systemes. – 2022. – URL: <https://www.3ds.com/newsroom/press-releases/dassault-systemes-h-hartmann-institute-and-institute-rafael-launch-vorthex-project-worlds-first-3d-simulator-radiotherapy> (дата обращения: 29.06.2023).
 294. Swayne M. Siemens Collaborates with Pasqal to Research Quantum Applications [Электронный ресурс] : in Computer Aided Engineering, Simulation and Testing. / The Quantum Insider. – 2022. – URL: <https://thequantuminsider.com/2022/04/07/siemens-collaborates-with-pasqal-to-research-quantum-applications-in-computer-aided-engineering-simulation-and-testing/> (дата обращения: 29.06.2023).
 295. Crunchbase [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.crunchbase.com/> (дата обращения: 29.06.2023).
 296. Valle A. A Fond Farewell to GrabCAD Workbench [Электронный ресурс] : 3D PRINTING, GRABCAD COMMUNITY, WORKBENCH. / GrabCAD. – 2023. – URL: <https://blog.grabcad.com/blog/2022/08/09/a-fond-farewell-to-grabcad-workbench/> (дата обращения: 28.06.2023).
 297. Zacks Update on Elio Motors [Электронный ресурс] : Misinformation Clarified. / Yahoo Finance. – 2017. – URL: <http://finance.yahoo.com/news/zacks-elio-motors-misinformation-clarified-161500783.html> (дата обращения: 28.06.2023).
 298. Anderton J. Elio Motors: The Other Breakthrough Car Company [Электронный ресурс] : Can Elio Motors succeed where Tesla is struggling with high-volume, low-cost vehicles? / Engineering.com. – 2016. – URL: <https://www.engineering.com/story/elio-motors-the-other-breakthrough-car-company> (дата обращения: 28.06.2023).
 299. Gold A. Elio Motors Returns From the Dead With 3-Wheeled Elio-E EV [Электронный ресурс] : Electric autocycles are so hot right now. / Motortrend. – 2021. – URL: <https://www.motortrend.com/news/elio-motors-e-electric-vehicle/> (дата обращения: 29.06.2023).

300. Shah W. Cars That Flopped in Pakistan Despite High Expectations [Электронный ресурс] : The Pakistani car market has seen a monumental rise. / ProPakistani. – 2022. – URL: <https://propakistani.pk/2022/12/05/cars-that-flopped-in-pakistan-despite-high-expectations/> (дата обращения: 29.06.2023).
301. <https://tribune.com.pk/author/221>. Does Suzuki have the answer to your dream car? [Электронный ресурс] : What does your dream car look like? / The Express Tribune. – 2017. – URL: <https://tribune.com.pk/story/1320785/suzuki-answer-dream-car> (дата обращения: 29.06.2023).
302. Ogewell V. Telecom Giant Ericsson Halts [Электронный ресурс] : Its PLM Project with Dassault's 3DEXPERIENCE. / Engineering.com. – 2019. – URL: <https://www.engineering.com/story/telecom-giant-ericsson-halts-its-plm-project-with-dassaults-3dexperience> (дата обращения: 29.06.2023).
303. Ogewell V. PLM at Jaguar Land Rover [Электронный ресурс] : The Moment of Truth for Dassault's 3DEXPERIENCE Platform. / Engineering.com. – 2015. – URL: <https://www.engineering.com/story/plm-at-jaguar-land-rover-the-moment-of-truth-for-dassaults-3dexperience-platform> (дата обращения: 29.06.2023).
304. Prickett N.H. Chip startup alleges Cadence sabotaged processor rollout [Электронный ресурс] : Tachyum blames deep conflicts of interest as source of Prodigy delays. / The Register. – 2022. – URL: https://www.theregister.com/2022/08/03/chip_upstart_alleges_cadence_sabotaged/ (дата обращения: 29.06.2023).
305. Bi Z. Practical Guide to Digital Manufacturing: First-Time-Right for Design of Products, Machines, Processes and System Integration. Practical Guide to Digital Manufacturing / Z. Bi Google-Books-ID: wPYvEAAAQBAJ. – Springer Nature, 2021. – 433 p.
306. Chen Y. Development and Application of CAD Technology / Y. Chen. – 2014. – Т. 1037. – С. 461-463.
307. Wang L. Big Data in Design and Manufacturing Engineering / L. Wang, C.A. Alexander // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 2. – P. 223-232.
308. Импортзамещение: CAD/ECAD/CAM/CAE-системы [Электронный ресурс]. – URL: https://catalog.arppsoft.ru/replacement/section_6050155 (дата обращения: 16.02.2023).
309. Best General-Purpose CAD Software in 2023 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.g2.com/categories/general-purpose-cad> (дата обращения: 14.03.2023).
310. Классификация САПР. Основы систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]. – URL: <http://bourabai.ru/cm/cad7.htm> (дата обращения: 11.04.2023).
311. Chen Y. Development and Application of CAD Technology / Y. Chen. – 2014. – Т. 1037. – С. 461-463.
312. Wang L. Big Data in Design and Manufacturing Engineering / L. Wang, C.A. Alexander // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 8. – № 2. – P. 223-232.
313. Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков [и др.]. – Издательство Политехнического университета, 2012. – 93 с.
314. Heimgartner J. 3D CAD Software Continues Growth Trajectory [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.engineering.com/story/3d-cad-software-continues-growth-trajectory> (дата обращения: 13.02.2023).
315. Frausto-Robledo A. Autodesk AutoCAD 2023 — AI, Upskilling Users and Performance -

- Architosh [Электронный ресурс]. – URL: <https://architosh.com/2022/05/autodesk-autocad-2023-ai-upskilling-users-and-performance/> (дата обращения: 14.03.2023).
316. Relevance of AI in computer-aided design [Электронный ресурс]. – URL: <https://softwaresim.com/blog/relevance-of-ai-in-computer-aided-design/> (дата обращения: 14.03.2023).
317. Markets R. and. Global CAD Software Market (2020 to 2030) – by Technology, Model, Deployment, Level and Application [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.globenews-wire.com/news-release/2020/11/19/2130084/28124/en/Global-CAD-Software-Market-2020-to-2030-by-Technology-Model-Deployment-Level-and-Application.html> (дата обращения: 29.12.2022).
318. Обзор популярных систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pointcad.ru/novosti/obzor-sistem-avtomatizirovannogo-proektirovaniya> (дата обращения: 21.02.2023).
319. ZW3D – Advanced 3D Drawing Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zwsoft.com/product/zw3d#design> (дата обращения: 20.03.2023).
320. CAD Software – 2D/3D CAD design and drafting software – GstarCAD [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gstarcad.net/> (дата обращения: 20.03.2023).
321. Translation: 14th Five-Year Plan for National Informatization – Dec. 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://digichina.stanford.edu/work/translation-14th-five-year-plan-for-national-informatization-dec-2021/> (дата обращения: 14.03.2023).
322. Yang Z. EDA software will become the next battle front in US-China chip war [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.technologyreview.com/2022/08/18/1058116/eda-software-us-china-chip-war/> (дата обращения: 14.03.2023).
323. Спроектировано в КОМПАС-3D: «Северсталь» запустила первый вагоноопрокидыватель, изготовленный собственными силами [Электронный ресурс]. – URL: <https://kompas.ru/experience/13/> (дата обращения: 14.03.2023).
324. ИТ-служба АО «Силовые машины»: «С переходом на Платформу nanoCAD мы запустили импортозамещение инженерного ПО» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nanocad.ru/press/news/it-sluzhba-ao-silovye-mashiny-s-perekhodom-na-platformu-nanocad-my-zapustili-importozameshchenie-inzh/> (дата обращения: 14.03.2023).
325. Сборочная модель системы прожига ячеистых пазов в детали авиадвигателя электроэрозионным методом [Электронный ресурс]. – URL: https://www.tflexcad.ru/projects/groove_piercing_system/ (дата обращения: 14.03.2023).
326. ОСК планирует внедрить отечественный судостроительный САПР за четыре года. – 2023.
327. Независимые отечественные разработчики систем CAD/CAE объединяются с Росатомом для обеспечения цифрового суверенитета российской промышленности [Электронный ресурс]. – URL: <https://get-sim.ru/news/nezavisimye-otechestvennye-razrabotchiki-sistem-ca/> (дата обращения: 14.03.2023).
328. Российские разработчики должны создать 2300 новых программ для промышленности за семь лет [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2022/12/19/956058-rossiiskie-razrabotchiki-dolzhni> (дата обращения: 13.02.2023).
329. Нестерова Е. Названы тренды развития продуктов CAD и CAE [Электронный ресурс]. – URL:

- https://www.cnews.ru/projects/2022/Nazvany_trendy_razvitiya_produktov_CAD_i_CAE (дата обращения: 14.03.2023).
330. Система для расчетов, анализа и симуляции физических процессов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.csoft.ru/soft/cae.html> (дата обращения: 14.03.2023).
 331. Best Computer-Aided Manufacturing Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.g2.com/categories/computer-aided-manufacturing> (дата обращения: 14.03.2023).
 332. Computer-Aided Engineering (CAE) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112> (дата обращения: 14.03.2023).
 333. Огородникова О.М. Исследовательская роль программ CAE в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM / О.М. Огородникова. – 2012. – № 1. – С. 25–31.
 334. Siemens, Hendrick Motorsports extend championship-winning technical partnership | Hendrick Motorsports [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hendrickmotorsports.com/news/articles/89692/siemens-hendrick-motorsports-extend-championship-winning-technical-partnership> (дата обращения: 15.02.2023).
 335. Hendrick Motorsports. Premier NASCAR team uses lessons learned as catalyst for improvement. – Siemens, 2013.
 336. Altair HyperWorks [Электронный ресурс]. – URL: <https://fea.ru/article/hyperworks> (дата обращения: 14.03.2023).
 337. NX CAE: Усовершенствованные средства инженерного анализа для принятия обоснованных решений о производстве изделий [Электронный ресурс]. – URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VIC/education/nx/Tab1/CAE.pdf>.
 338. Стартовала программа «Росатома» по содействию отраслям в переходе на российское инженерное ПО [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/224544/2023-02-21/2023-w08/startovala-programma-rosatoma-sodeystviyu-otraslyam-perekhode-rossiyskoe-inzhenernoe> (дата обращения: 20.03.2023).
 339. Линейка программных продуктов APM [Электронный ресурс]. – URL: <https://apm.ru/products> (дата обращения: 14.03.2023).
 340. Расчет рамы и кузова полуприцепа-самосвала в APM WinMachin [Электронный ресурс]. – URL: <https://apm.ru/semi-trailer-dump-truck> (дата обращения: 15.02.2023).
 341. Инновационная CAE-система, осуществляющая полный цикл инженерных расчётов от построения расчётной сетки до визуализации результатов расчёта | CAE Fidesys [Электронный ресурс]. – URL: <https://cae-fidesys.com/> (дата обращения: 14.03.2023).
 342. В новой версии CAE-пакета «Логос» расширено использование российского геометрического ядра C3D Modeler [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.c3dlabs.com/ru/blog/customer-stories/v-novoy-versii-cae-paketa-logos-rasshireno-ispolzovanie-rossiyskogo-geometricheskogo-yadra-c3d-model/> (дата обращения: 14.03.2023).
 343. PRADIS системное моделирование [Электронный ресурс]. – URL: <https://pradis.laduga.ru/> (дата обращения: 14.03.2023).
 344. Увеличение производительности CAE-систем с помощью HPC-технологий [Электронный ресурс]. – URL: <https://fea.ru/news/7116> (дата обращения: 21.02.2023).

345. What is High Performance Computing [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.netapp.com/data-storage/high-performance-computing/what-is-hpc/> (дата обращения: 21.02.2023).
346. Leveraging high-performance computing for CAE workloads technical white paper. Technical white paper [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hpe.com/psnow/doc/a00005355ENW> (дата обращения: 22.02.2023).
347. СПбПУ и РСК создадут Центр компетенций для разработки новых промышленных решений на базе передовых цифровых технологий [Электронный ресурс]. – URL: <https://rscgroup.ru/news/memorandumspbpu/> (дата обращения: 21.02.2023).
348. Tundra OCP HPC & AI Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.penguinsolutions.com/computing/products/ocp-hpc-and-ai-systems/> (дата обращения: 26.04.2023).
349. Yancey R. Bird Strike Simulation Takes Flight [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.orstech.com/casestudy/C2R2011-Bird-Strike.pdf>.
350. Патракова А. В мировом топе суперкомпьютерных держав Россия поднялась с десятого на восьмое место [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cnews.ru/news/top/2022-05-30_v_mirovom_tope_superkompyuternyh (дата обращения: 20.03.2023).
351. Суперкомпьютер «Ломоносов» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.msu.ru/lomonosov/science/computer.html> (дата обращения: 26.04.2023).
352. CML-Bench® – цифровая платформа разработки и применения цифровых двойников (Digital Twins), система управления деятельностью в области цифрового инжиниринга – FEA.RU | CompMechLab – разработка и применение цифровых двойников (digital twin), цифровое проектирование, CAD/CAE/CAM/CAO/HPC [Электронный ресурс]. – URL: <https://fea.ru/article/cml-bench> (дата обращения: 30.06.2023).
353. Цифровой двойник начальной стадии ядерного цикла | Центр НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» [Электронный ресурс]. – URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/81 (дата обращения: 20.03.2023).
354. ЭЙЧПИСИ ХАБ РИСЕРЧ | Участник проекта «Сколково» [Электронный ресурс]. – URL: <https://navigator.sk.ru/orn/1121378> (дата обращения: 27.04.2023).
355. Deans M. What is CAM (Computer-Aided Manufacturing)? [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/> (дата обращения: 09.02.2023).
356. Best Computer-Aided Engineering (CAE) Software 2023 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.g2.com/categories/simulation-cae> (дата обращения: 15.03.2023).
357. CAM Software Market – Global Industry Analysis and Forecast (2022-2029) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-cam-software-market/102401/> (дата обращения: 15.03.2023).
358. Fusion 360 – прогрессивные технологии проектирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://promo.softline.ru/autodesk-fusion> (дата обращения: 14.03.2023).
359. SolidWorks CAM [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-cam> (дата обращения: 14.03.2023).
360. NX CAM: от простого программирования станков с ЧПУ до многоосевой обработки [Электронный ресурс]. – URL: <https://slddigital.com/article/nx-cam/> (дата обращения: 14.03.2023).

361. Automation helps a machine shop thrive in a competitive marketplace [Электронный ресурс]. – URL: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/case-study-jk-machining> (дата обращения: 14.03.2023).
362. SprutCAM | CAM-система [Электронный ресурс]. – URL: <https://sprut.ru/sprutcam/> (дата обращения: 14.03.2023).
363. Научно-производственная фирма Анком [Электронный ресурс]. – URL: <https://scwp.ru/> (дата обращения: 14.03.2023).
364. Опыт использования отечественной CAM-системы в производстве гребных винтов [Электронный ресурс]. – URL: https://www.planetacam.ru/articles/success/opyt_ispolzovaniya_otechestvennoy_cam_sistemy_v_proizvodstve_grebnykh_vintov/ (дата обращения: 14.03.2023).
365. Product Data Management (PDM) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/product-data-management/13214> (дата обращения: 14.03.2023).
366. What is Product Data Management? | PDM Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ptc.com/en/technologies/plm/product-data-management> (дата обращения: 14.03.2023).
367. Импортзамещение: PDM – системы (Product Data Management) [Электронный ресурс]. – URL: https://catalog.arppsoft.ru/replacement/section_6129766 (дата обращения: 16.02.2023).
368. Best Product Data Management (PDM) Software in 2023 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.g2.com/categories/product-data-management-pdm> (дата обращения: 14.03.2023).
369. Application of product data management technologies for enterprise integration / J. Gao [и др.]. – 2013. – Т. 16. – № 7-8.
370. Using Product Data Management Systems for Civil Engineering Projects – Potentials and Obstacles / A. Borrmann [и др.] // Proceedings of the 2009 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering. – 2009. – Т. 346.
371. Rokion. Designing from the (under)ground up [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autodesk.com/customer-stories/rokion> (дата обращения: 15.03.2023).
372. Полянова В. План амбициозен, но в целом выполним [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vedomosti.ru/technologies/new_technologies/articles/2022/11/16/950499-plan-ambitsiozen-no-vipolnim (дата обращения: 15.03.2023).
373. ЛОЦМАН:КБ. Автоматизированная система управления проектированием и электронным архивом конструкторской документации [Электронный ресурс]. – URL: <https://ascon.ru/products/1219/review/> (дата обращения: 15.03.2023).
374. Как компания «Уралтехфильтр» преодолела «цифровой» кризис и внедрила PDM-систему [Электронный ресурс]. – URL: https://ascon.ru/news_and_events/news/3156/ (дата обращения: 16.02.2023).
375. 1C:PDM Управление инженерными данными 3 [Электронный ресурс]. – URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/pdm3/> (дата обращения: 10.03.2023).
376. Troy S. Product Lifecycle Management (PLM): Definition, Benefits, History [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.investopedia.com/terms/p/product-life-cycle-management.asp>.

377. What Is PLM Software? Product Lifecycle Management [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.oracle.com/scm/product-lifecycle-management/what-is-plm/> (дата обращения: 15.03.2023).
378. What Is PLM? | Product Lifecycle Management (PLM) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ptc.com/en/technologies/plm> (дата обращения: 15.03.2023).
379. Best PLM Software in 2023 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.g2.com/categories/plm> (дата обращения: 15.03.2023).
380. Pang A. Top 10 PLM and Engineering Software Vendors, Market Size and Market Forecast 2021-2026 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.appsruntheworld.com/top-10-product-lifecycle-management-engineering-software-vendors-and-market-forecast/> (дата обращения: 15.03.2023).
381. PLM software | Siemens Teamcenter [Электронный ресурс]. – URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/teamcenter/> (дата обращения: 15.03.2023).
382. Цифровая платформа 3DEXPERIENCE — уникальная среда создания устойчивых инноваций [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.3ds.com/ru/3dexperience> (дата обращения: 15.03.2023).
383. Windchill. PLM система от PTC. Управление жизненным циклом [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.irisoft.ru/products/windchill/> (дата обращения: 15.03.2023).
384. T-FLEX PLM. Российский программный комплекс для управления ЖЦИ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tfex.ru/plm/> (дата обращения: 15.03.2023).
385. ЛОЦМАН:PLM [Электронный ресурс]. – URL: <https://ascon.ru/products/889/review> (дата обращения: 15.03.2023).
386. Форум «Белые ночи САПР»: PLM-кейсы от ОПК и гражданского машиностроения [Электронный ресурс]. – URL: https://ascon.ru/news_and_events/news/3289/ (дата обращения: 15.03.2023).
387. Росатом готовится вывести на рынок отечественную PLM-систему [Электронный ресурс]. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/15120571> (дата обращения: 15.03.2023).
388. Всем госорганам России приказали перейти с Windows на Linux [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.moscowtimes.ru/2022/06/24/vsem-gosorganam-rossii-prikazali-pereiti-s-windows-na-linux-a21631> (дата обращения: 15.03.2023).
389. Shahrubudin N. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications / N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 35. – An Overview on 3D Printing Technology. – P. 1286-1296.
390. Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing / A.A. Martin [et al.] // *Nature Communications*. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 1987.
391. Plocher J. Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures / J. Plocher, A. Panesar // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 183. – Review on design and structural optimisation in additive manufacturing. – P. 108164.
392. Improving the Efficiency of Automated Precision Robotics-Enabled Positioning and Welding / A.Y. Efimov [и др.] // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf» 2019 International Science and Technology Conference «EastConf». – Vladivostok, Russia: IEEE, 2019. – С. 1-5.

393. Optimization of parts manufactured using continuous fiber three-dimensional printing technology / B. Fedulov [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2021. – Vol. 227. – P. 109406.
394. Hardware Factors Influencing Strength of Parts Obtained by Fused Filament Fabrication / V.E. Kuznetsov [et al.] // Polymers. – 2019. – Vol. 11. – № 11. – P. 1870.
395. Copyright Protection of Computer Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wipo.int/copyright/en/activities/software.html> (дата обращения: 20.06.2023).
396. Luminoso L. Integrating AI in CAD/ CAM [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/automationsoftware/integrating-ai-in-cadcam> (дата обращения: 15.03.2023).
397. Российская Федерация. ГК РФ Статья 1350. Условия патентоспособности изобретения [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64629/4b30fa7ca4e5733597a1bc9b2b12351cc5c430e6/.
398. Постановление от 24 ноября 2022 года №2131. – Правительство РФ, 2022.
399. Поддержка экспорта российских программных продуктов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.arppsoft.ru/association/key-topics/export/> (дата обращения: 11.05.2023).
400. «Топ Системы» на конференции «ЦИПР» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tflex.ru/about/news/detail/index.php?ID=5249> (дата обращения: 28.06.2023).
401. ISO - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas TC Participation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/member/1579.html?view=participation&t=PT> (дата обращения: 01.06.2023).
402. ABNT NBR ISO/IEC 25030:2008 Software engineering - Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Quality requirements [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.abntcatalogo.com.br/pnm.aspx?Q=andxaTJ0SDhXdEc5czdCNDZSYi90Mm1JcGd-LUKV1TU5EODZtSkYwYjZsTT0=> (дата обращения: 01.06.2023).
403. ABNT/CEE-254 – Comissão de Estudo Especial da Indústria 4.0 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.abnt.org.br/temas-estrategicos/industria-4> (дата обращения: 01.06.2023).
404. ISO - BIS - Bureau of Indian Standards TC Participation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/member/1794.html?view=participation&t=S> (дата обращения: 01.06.2023).
405. IS 13394 : 2021/ISO/IEC 26514 : 2008 Systems and Software Engineering - Requirements for Designers and Developers of User Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=13394_2021 (дата обращения: 01.06.2023).
406. IS 16417 : 2015/ISO/IEC 25001 : 2014 Software Engineering - Software Product Quality Requirements and Evaluation (Square) - Planning and Management [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=16417_2015_Reff2021 (дата обращения: 01.06.2023).
407. IS 16124 : 2020/ISO/IEC/IEEE 12207 : 2017 Systems and Software Engineering - Software Life Cycle Processes [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=16124_2020 (дата обращения: 01.06.2023).
408. IS 16456 : 2016 / ISO/IEC 14764 : 2006 Software Engineering - Software Life Cycle Processes - Maintenance [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=16456_2016_Reff2019 (дата обращения: 01.06.2023).

409. IS 16458: 2015/ISO/IEC 16085: 2006 Systems and Software Engineering – Life Cycle Processes – Risk Management [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=16458_2015_Reff2021 (дата обращения: 01.06.2023).
410. IS/ISO/IEC TS 30103: 2015 Software and Systems Engineering – Lifecycle Processes – Framework for Product Quality Achievement [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=IOETS30103_2015_Reff2021 (дата обращения: 01.06.2023).
411. IS/ISO/IEC/IEEE 42010: 2011 Systems and Software Engineering – Architecture Description [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=IOEE42010_2011_Reff2021 (дата обращения: 01.06.2023).
412. IS/ISO/IEC/IEEE 90003: 2018 Software Engineering – Guidelines for the Application of ISO 9001: 2015 to Computer Software [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=IOEEE90003_2018_Reff2020 (дата обращения: 01.06.2023).
413. IS/ISO 13567: Part 1: 2017 Technical Product Documentation – Organization and Naming of Layers for CAD Part 1 Overview and Principle [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=IO13567_1_2017 (дата обращения: 01.06.2023).
414. IS/ISO 13567: Part 2: 2017 Technical Product Documentation – Organization and Naming of Layers for CAD Part 2 Concepts, Format and Codes used in Construction Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://standardsbis.bsbedge.com/BIS_Preview.aspx?id=IO13567_2_2017 (дата обращения: 01.06.2023).
415. IS/ISO 13567-1: Technical Product Documentation – Organization and Naming of Layers for CAD, Part 1: Overview and Principles: Bureau of Indian Standards: Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive [Электронный ресурс]. – URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.iso.13567.1.1998> (дата обращения: 01.06.2023).
416. Strategic road map Electronics and IT division council (LITDC) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.services.bis.gov.in/tmp/ELECTRONICS%20AND%20IT%20DIVISION%20COUNCIL.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).
417. Bureau of Indian Standards Committee | Dashboard [Электронный ресурс]. – URL: https://www.services.bis.gov.in/php/BIS_2.0/bisconnect/dgdashboard/committee_sso/committeeDetails/66 (дата обращения: 01.06.2023).
418. IS 15398: 2003 Software for computers in the safety systems of nuclear and radiation facilities [Электронный ресурс]. – URL: https://www.services.bis.gov.in/php/BIS_2.0/bisconnect/standard_review/Standard_review/Isdetails?ID=NzQ5OA%3D%3D (дата обращения: 01.06.2023).
419. IS 16456: 2016 Software engineering – Software life cycle processes – Maintenance [Электронный ресурс]. – URL: https://www.services.bis.gov.in/php/BIS_2.0/bisconnect/standard_review/Standard_review/Isdetails?ID=MjlyMzU%3D (дата обращения: 01.06.2023).
420. IS/ISO/IEC 90003: 2018 Software engineering Guidelines for the application of ISO 9001:2008 to computer software [Электронный ресурс]. – URL: https://www.services.bis.gov.in/php/BIS_2.0/bisconnect/standard_review/Standard_review/Isdetails?ID=MjYyMDU%3D (дата обращения: 01.06.2023).
421. IS/ISO/IEC 30130: 2016 Software engineering Capabilities of software testing tools [Электронный ресурс]. – URL:

- https://www.services.bis.gov.in/php/BIS_2.0/bisconnect/standard_review/Standard_review/Isdetails?ID=MjU1OTE%3D (дата обращения: 01.06.2023).
422. Standards National Action Plan (SNAP) 2022-27 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bis.gov.in/wp-content/uploads/2023/05/SNPbookBilingual.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).
 423. SABS Webstore [Электронный ресурс]. – URL: <https://store.sabs.co.za/> (дата обращения: 02.06.2023).
 424. ISO/IEC TR 9126-4:2004 Программирование. Качество продукта. Часть 4. Качество при использовании показателей [Электронный ресурс]. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/3634246.aspx> (дата обращения: 02.06.2023).
 425. ISO/IEC TR 19759:2005 Совокупность знаний о разработке программного обеспечения. Руководство [Электронный ресурс]. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/3630513.aspx> (дата обращения: 02.06.2023).
 426. ISO/IEC TR 14471:2007: Информационные технологии. Программирование. Руководящие положения по принятию средств автоматизированной разработки программного обеспечения [Электронный ресурс]. – URL: https://standartgost.ru/g/ISO/IEC_TR_14471:2007 (дата обращения: 02.06.2023).
 427. ISO/IEC 14764:2006 Разработка программного обеспечения. Процессы жизненного цикла программного обеспечения. Сопровождение – ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=3614577> (дата обращения: 02.06.2023).
 428. ISO/IEC/IEEE 16326:2009 Разработка систем и программного обеспечения. Процессы жизненного цикла. Управление проектом – ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4580586> (дата обращения: 02.06.2023).
 429. ISO 14739-1:2014 Управление документооборотом. Использование 3D в формате компактного представления документа (PRC). Часть 1. PRC 10001 – ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5495264> (дата обращения: 02.06.2023).
 430. ISO/IEC TR 24774:2010 Разработка систем и программного обеспечения. Менеджмент жизненного цикла. Руководящие указания по описанию процесса – ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ [Электронный ресурс]. – URL: <https://en.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4573098> (дата обращения: 02.06.2023).
 431. ISO/IEC TR 20004:2015 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Уточнённый анализ уязвимости программного обеспечения по ISO/IEC 15408 и ISO/IEC 18045 – ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6110873> (дата обращения: 02.06.2023).
 432. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла системы [Электронный ресурс]. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6098128.aspx> (дата обращения: 02.06.2023).
 433. ISO/IEC 16350:2015 Информационная технология. Проектирование систем и разработка программного обеспечения. Управление приложениями – ФГБУ «Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6102030> (дата обращения: 02.06.2023).
 434. ISO/IEC/IEEE 90003:2018 Разработка программного обеспечения. Руководящие указания

- по применению ISO 9001:2015 к компьютерному программному обеспечению [Электронный ресурс]. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6439481.aspx> (дата обращения: 02.06.2023).
435. List of published standards SABS [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sabs.co.za/Business_Units/Standards_SA/SABSTAN/STANDARDS_DEVELOPMENT/Published_Standards/PS001.PDF (дата обращения: 02.06.2023).
 436. Software & Systems Engineering Standards Committee IEEE [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.computer.org/volunteering/boards-and-committees/standards-activities/committees/s2esc> (дата обращения: 02.06.2023).
 437. IEEE/ISO/IEC 15026-1-2019 Systems and software engineering – Systems and software assurance – Part 1: Concepts and vocabulary [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/15026-1/7155/> (дата обращения: 02.06.2023).
 438. IEEE/ISO/IEC 15288-2023 Systems and software engineering – System life cycle processes [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/15288/10424/> (дата обращения: 02.06.2023).
 439. IEEE/ISO/IEC 24641-2023 Systems and Software engineering – Methods and tools for model-based systems and software engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24641/10139/> (дата обращения: 02.06.2023).
 440. IEEE/ISO/IEC 42010-2022 Software, systems and enterprise – Architecture description [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/42010/6846/> (дата обращения: 02.06.2023).
 441. IEEE/ISO/IEC 29119-1-2013 Software and systems engineering – Software testing – Part 1: Concepts and definitions [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/29119-1/5308/> (дата обращения: 02.06.2023).
 442. IEEE 15026-1-2011 Adoption of ISO/IEC TR 15026-1:2010 Systems and Software Engineering – Systems and Software Assurance – Part 1: Concepts and Vocabulary [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/15026-1/5064/> (дата обращения: 02.06.2023).
 443. IEEE 15026-2 – Adoption of ISO/IEC 15026-2:2011 Systems and Software Engineering — Systems and Software Assurance — Part 2: Assurance Case | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/1401620/ieee-15026-2> (дата обращения: 02.06.2023).
 444. IEEE/ISO/IEC 41062-2019 Software engineering – Recommended practice for software acquisition [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/41062/10065/> (дата обращения: 02.06.2023).
 445. IEEE 26514-2010 Adoption of ISO/IEC 26514:2008 Systems and Software Engineering – Requirements for Designers and Developers of User Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/26514/4990/> (дата обращения: 02.06.2023).
 446. IEEE/ISO/IEC 24765-2010 Systems and software engineering – Vocabulary [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24765/4750/> (дата обращения: 02.06.2023).
 447. IEEE 828-2012 Configuration Management in Systems and Software Engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/828/5367/> (дата обращения: 02.06.2023).
 448. P2806 System Architecture of Digital Representation for Physical Objects in Factory Environments [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/2806/7524/> (дата

обращения: 02.06.2023).

449. IEEE/ISO/IEC 24774-2021 Systems and software engineering - Life cycle management - Specification for process description [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24774/10126/> (дата обращения: 02.06.2023).
450. DS/ISO/IEC/IEEE 26531 - Systems and software engineering – Content management for product life-cycle, user and service management documentation | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/9933562/ds-iso-iec-ieee-26531> (дата обращения: 02.06.2023).
451. CSA ISO/IEC/IEEE 24748-1 - Systems and software engineering — Life cycle management — Part 1: Guidelines for life cycle management | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/14224318/csa-iso-iec-ieee-24748-1> (дата обращения: 02.06.2023).
452. CSA ISO/IEC/IEEE 24748-4 - Systems and software engineering - Life cycle management - Part 4: Systems engineering planning | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/10194660/csa-iso-iec-ieee-24748-4> (дата обращения: 02.06.2023).
453. ISO/IEC TS 24748-6 - Systems and software engineering - Life cycle management - Part 6: System integration engineering | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/10057351/iso-iec-ts-24748-6> (дата обращения: 02.06.2023).
454. IEEE/ISO/IEC 12207-2017 Systems and software engineering - Software life cycle processes [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/12207/5672/> (дата обращения: 02.06.2023).
455. ISO/IEC TS 30103 - Software and Systems Engineering - Lifecycle Processes - Framework for Product Quality Achievement | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/9957777/iso-iec-ts-30103> (дата обращения: 02.06.2023).
456. ISO/IEC/IEEE 16085 - Systems and software engineering — Life cycle processes — Risk management | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/14231493/iso-iec-ieee-16085> (дата обращения: 02.06.2023).
457. 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) | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/14339409/ds-iso-iec-ieee-24748-3> (дата обращения: 02.06.2023).
458. IEEE/ISO/IEC 14764-2021 Software engineering - Software life cycle processes - Maintenance [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/14764/7701/> (дата обращения: 02.06.2023).
459. IEEE/ISO/IEC 24748-5-2017 Systems and Software Engineering - Life Cycle Management - Part 5: Software Development Planning [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/24748-5/5664/> (дата обращения: 02.06.2023).
460. IEEE/ISO/IEC 29148-2018 Systems and software engineering - Life cycle processes - Requirements engineering [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/29148/6937/> (дата обращения: 02.06.2023).
461. IEEE 14102 - Adoption of ISO/IEC 14102:2008 Information Technology—Guideline for the Evaluation and Selection of CASE Tools | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/1284124/ieee-14102> (дата обращения: 02.06.2023).

462. IEEE 14471 - Guide for Adoption of ISO/IEC TR 14471:2007 Information Technology-Software Engineering-Guidelines for the Adoption of CASE Tools | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/1278918/ieee-14471> (дата обращения: 02.06.2023).
463. National CAD Standard 4.0 [Электронный ресурс]. – URL: https://web.itu.edu.tr/~yamanhak/ders/mcs/U_S_N_C_S-v4.pdf (дата обращения: 03.06.2023).
464. United States National CAD Standard - V5 [Электронный ресурс]. – URL: <https://facilities.duke.edu/sites/default/files/AIA%20CAD%20Layer%20Guidelines.pdf> (дата обращения: 03.06.2023).
465. United States National CAD Standard - V6 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nationalcadstandard.org/ncs6/> (дата обращения: 03.06.2023).
466. Autodesk: Соответствие государственному стандарту САПР [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.autodesk.com/BLDSYS/2014/RUS/index.html?url=files/GUID-741BDF62-0BD4-43B7-84FC-0B8DB8C12562.htm,topicNumber=d30e90998> (дата обращения: 03.06.2023).
467. J826/3_202111: 3D CAD for SAE J826 H-Point Machine - SAE International [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sae.org/standards/content/j826/3_202111/ (дата обращения: 03.06.2023).
468. TS144-2: TS144 CAE Systems Training - SAE International [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sae.org/standards/content/ts144-2/> (дата обращения: 03.06.2023).
469. AMS2547: Electropolishing of Metallic Parts and Materials Using Computer Aided Engineering - SAE International [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sae.org/standards/content/ams2547/> (дата обращения: 03.06.2023).
470. G-34 Artificial Intelligence in Aviation - SAE Standards Works [Электронный ресурс]. – URL: <https://standardsworks.sae.org/standards-committees/g-34-artificial-intelligence-aviation> (дата обращения: 24.04.2023).
471. ASME VVUQ 50 Verification, validation, and uncertainty quantification of computational modeling for advanced manufacturing [Электронный ресурс]. – URL: <https://cstools.asme.org/csconnect/CommitteePages.cfm?Committee=101978604> (дата обращения: 03.06.2023).
472. Y14.41 - Digital Product Definition Data Practices - ASME [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-41-digital-product-definition-data-practices> (дата обращения: 03.06.2023).
473. NASA-STD-7009 Стандарт для моделей и моделирования [Электронный ресурс]. – URL: http://www.gppb.ru/get_publication.php?id=56006 (дата обращения: 03.06.2023).
474. NASA-STD-7009 - STANDARD FOR MODELS AND SIMULATIONS | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.globalspec.com/std/10061325/NASA-STD-7009> (дата обращения: 03.06.2023).
475. NASA-STD-7009 Standard for Models and Simulations [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-7009> (дата обращения: 05.06.2023).
476. NASA-STD-2817 Computer-Aided Engineering, Design and Manufacturing Data Interchange Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.nasa.gov/standard/NASA/NASA-STD-2817> (дата обращения: 05.06.2023).
477. Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations (AIAA

- G-077-1998(2002)) | AIAA Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/4.472855.001> (дата обращения: 03.06.2023).
478. DIN VDI 2218-2003 Information technology in product development [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/551721573> (дата обращения: 03.06.2023).
 479. VDI 2218 Information technology in product development – Feature Technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/wdc-beuth:din21:60769810> (дата обращения: 03.06.2023).
 480. NA 121-07-02 AA Design of 3D models based on properties according to DIN 4000 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/fws/national-committees/wdc-grem:din21:111731315> (дата обращения: 03.06.2023).
 481. DIN 4003-210 Concept for the design of 3D models based on properties according to DIN 4000 – Part 210: Cutting machine tools [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/fws/publications/wdc-beuth:din21:339665013> (дата обращения: 03.06.2023).
 482. DIN EN 9300-115 Aerospace series – LOTAR – LOng Term Archiving and Retrieval of digital technical product documentation such as 3D, CAD and PDM data – Part 115: Explicit CAD assembly structure; German and English version EN 9300-115:2018 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/nl/publications/wdc-beuth:din21:291415176> (дата обращения: 03.06.2023).
 483. DIN EN 61188-7:2017-12 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7097170&type=dke%7Cdokument> (дата обращения: 03.06.2023).
 484. DIN EN IEC 62443-4-1 (VDE 0802-4-1):2018-10 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7110471&type=dke%7Cdokument> (дата обращения: 03.06.2023).
 485. DIN EN IEC 62443-4-1; VDE 0802-4-1:2018-10 Security for industrial automation and control systems – Part 4-1: Secure product development lifecycle requirements (IEC 62443-4-1:2018); German version EN IEC 62443-4-1:2018 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/dke/publications/wdc-beuth:din21:292194568> (дата обращения: 03.06.2023).
 486. DIN EN 62023 (VDE 0040-6):2012-08 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7019085&type=dke%7Cdokument> (дата обращения: 03.06.2023).
 487. VDI 2219 Information technology in product development – Introduction and usage of PDM systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/wdc-beuth:din21:258242697> (дата обращения: 03.06.2023).
 488. VDI/VDE 3697 Blatt 2 Recommendation for the technical implementation of data exchange between engineering systems – Data exchange between CAE systems of the process design and PCE hardware planning according to NE 159 with AutomationML [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/wdc-beuth:din21:306163809> (дата обращения: 03.06.2023).
 489. NF C46-680; NF EN 62424:2017-01-28 Representation of process control engineering – Requests in P&I diagrams and data exchange between P&ID tools and PCE-CAE tools [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.din.de/en/wdc-beuth:din21:268289641> (дата обращения: 03.06.2023).
 490. E DIN EN 62424 (VDE 0810-24):2014-05 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7036200&type=dke%7Cdokument>

- (дата обращения: 03.06.2023).
491. DIN EN 62424 (VDE 0810-24):2017-12 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7098645&type=dke%7Cdokument> (дата обращения: 03.06.2023).
 492. EN 62424:2016-11 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7081997&type=dke%7Cdokument> (дата обращения: 03.06.2023).
 493. DIN EN ISO 13567-1 - Technical product documentation - Organization and naming of layers for CAD - Part 1: Overview and principles (ISO 13567-1:2017) | GlobalSpec [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.global-spec.com/std/10276970/DIN%20EN%20ISO%2013567-1> (дата обращения: 03.06.2023).
 494. The NAFEMS Standards Initiative A - E [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nafems.org/publications/standards/standards-a-e/> (дата обращения: 04.06.2023).
 495. The NAFEMS Standards Initiative F - I [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nafems.org/publications/standards/standards-f-i/> (дата обращения: 04.06.2023).
 496. The NAFEMS Standards Initiative J - Z [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nafems.org/publications/standards/standards-j-z/> (дата обращения: 04.06.2023).
 497. CEN/TC 310 - Advanced automation technologies and their applications [Электронный ресурс]. – URL: https://standards.cen-cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:32:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:6291,25&cs=1F6C7642BCA60206E357EBA170100D539 (дата обращения: 04.06.2023).
 498. CEN/TC 304 - Information and communications technologies - European localization requirements [Электронный ресурс]. – URL: https://standards.cen-cenelec.eu/dyn/www/f?p=205:7:0:::FSP_ORG_ID:6285&cs=1DE1246DFD87F19EE40AA828E5BCABDC3 (дата обращения: 04.06.2023).
 499. ETSI - ETSI Technology Radar [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.etsi.org/technologies/technology-radar> (дата обращения: 27.03.2023).
 500. Standards - Ecma International [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ecma-international.org/publications-and-standards/standards/?order=category> (дата обращения: 04.06.2023).
 501. Mechanical : Computer Aided Design : CAD Standards : CAD Standards [Электронный ресурс]. – URL: https://www.brainkart.com/article/CAD-Standards_5726/ (дата обращения: 30.04.2023).
 502. Разработка стандарта по цифровому проектированию и технологической подготовке производства | Группа компаний «ПЛМ Урал» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.plm-ural.ru/resheniya/razrabotka-standartov-po-cifrovomu-proektirovaniyu> (дата обращения: 30.04.2023).
 503. SMACNA CAD Standard Second Edition [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.smacna.org/getattachment/230a69ee-dc49-405a-ae39-8382f9c7462a/SMACNA-CAD-Standard.pdf> (дата обращения: 30.04.2023).
 504. Part 641 Drafting and Drawings National Engineering Handbook Chapter 1 Computer Aided Design (CAD) Standards [Электронный ресурс]. – URL:

- <https://studylib.net/doc/18425482/chapter-1-computer-aided-design--cad--standards> (дата обращения: 30.04.2023).
505. A/E/C Computer-Aided Design (CAD) Standard [Электронный ресурс]. – URL: https://wbdg.org/FFC/AECCAD/ERDC_ITL_TR-19-7_2019.pdf (дата обращения: 30.04.2023).
 506. Naval engineering computer aided design standards [Электронный ресурс]. – URL: https://media.defense.gov/2017/Mar/16/2001717398/-1/-1/0/CIM_9085_1C.PDF (дата обращения: 30.04.2023).
 507. Pfeifer M.R. Computer-Aided Standardisation for Manufacturing and Maintenance Activities / M.R. Pfeifer // Technological Engineering. – 2019. – № 16(1). – С. 22-24.
 508. DCAMM CAD Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mass.gov/doc/cad-standards-manual/download> (дата обращения: 30.04.2023).
 509. Computer Aided Drafting (CAD) Standards Facilities Planning and Construction [Электронный ресурс]. – URL: <https://facilities.unl.edu/CAD/CAD%20Drafting%20Standards-%20October%202020.pdf> (дата обращения: 30.04.2023).
 510. Understanding the COM-HPC standard for modular system designs - Embedded.com [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.embedded.com/understanding-the-com-hpc-standard-for-modular-system-designs/> (дата обращения: 30.04.2023).
 511. COM-HPC: что нужно знать разработчикам и пользователям [Электронный ресурс]. – URL: <https://controleng.ru/vstraivaemy-e-sistemy/com-hpc/> (дата обращения: 30.04.2023).
 512. PICMG | Standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.picmg.org/openstandards/> (дата обращения: 30.04.2023).
 513. Qadamboyev E. Standardization of CAD objects / E. Qadamboyev, S. Xushvaktov, J. Djumanov // Golden Brain. – 2023. – № 1(5). – С. 121-125.
 514. Quaglia T. A rational approach to CAD standardization / T. Quaglia. – 2011.
 515. Krma S. Flat Versus Hierarchical Information Models in PLM Standardization Frameworks / S. Krma, J. Lubell // IFIP International Conference on Product Lifecycle Management. – 2017. – № 492. – С. 121-133.
 516. PLM Standards Modelling for Enterprise Interoperability: A Manufacturing Case Study for ERP and MES Systems Integration Based on ISA-95 / E. Moones [и др.] // 6th International IFIP Working Conference on Enterprise Interoperability (IWEI). – 2015. – С. 157-170.
 517. PLM-related industry standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.product-lifecycle-management.com/plm-cm-industry-standards.htm> (дата обращения: 30.04.2023).
 518. CIMdata PLM Webinar Series: Navigating the PLM Standards Universe, 2016 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cimdata.com/images/Webinars/CIMdata_Webinar_Nov2016.pdf (дата обращения: 30.04.2023).
 519. Digital Twin | StandICT.eu 2026 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.standict.eu/digital-twin/321> (дата обращения: 30.04.2023).
 520. Abu Dhabi Government Data management standards [Электронный ресурс]. – URL: <https://adda.gov.ae/-/media/Project/TAMM/ADDA/Publications/DATA-MANAGEMENT-STANDARDS---EN.pdf>.
 521. A review of the technology standards for enabling digital twin / K. Wang [и др.] // Digital Twin. – 2022. – № 2:4. – С. 18.

522. ISO/IEC JTC 1/SC 41 Internet of Things and Digital Twin [Электронный ресурс]. – URL: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:614501043770693:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:20486,25 (дата обращения: 16.06.2023).
523. ISO/IEC AWI 30173 - Digital twin — Concepts and terminology [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/81442.html> (дата обращения: 16.06.2023).
524. IEC ISO/IEC JTC 1/SC 41 Dashboard > Projects: Work programme, Publications, Maintenance cycle, Project files, TC/SC in figures [Электронный ресурс]. – URL: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:614501043770693:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:20486,23,104883 (дата обращения: 16.06.2023).
525. RTCA DO-178 Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification [Электронный ресурс]. – URL: <https://standards.nasa.gov/standard/NASA/RTCA-DO-178> (дата обращения: 16.06.2023).
526. ISO/IEC 14882:2011 - Information technology — Programming languages — C++ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/50372.html> (дата обращения: 16.06.2023).
527. ИСО - ISO 9001 — Системы менеджмента качества [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/ru/iso-9001-quality-management.html> (дата обращения: 16.06.2023).
528. C++ Core Guidelines [Электронный ресурс]. – URL: <https://isocpp.github.io/CppCoreGuidelines/CppCoreGuidelines> (дата обращения: 16.06.2023).
529. History: The Agile Manifesto [Электронный ресурс]. – URL: <http://agilemanifesto.org/history.html> (дата обращения: 16.06.2023).
530. Agile-манифест разработки программного обеспечения [Электронный ресурс]. – URL: <http://agilemanifesto.org/iso/ru/manifesto.html> (дата обращения: 16.06.2023).
531. основополагающие принципы Agile-манифеста [Электронный ресурс]. – URL: <http://agilemanifesto.org/iso/ru/principles.html> (дата обращения: 16.06.2023).
532. Agile методология — принципы Agile управления проектами | Экспертные статьи ProКачество [Электронный ресурс]. – URL: <https://kachestvo.pro/kachestvo-upravleniya/proektnoe-upravlenie/printsiyu-agile/> (дата обращения: 16.06.2023).
533. Agile May Be Fragile; Resilience Is the Goal | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/blogs/blogrige/agile-may-be-fragile-resilience-goal> (дата обращения: 16.06.2023).
534. К общему знаменателю. Зачем нужны стандарты в Agile [Электронный ресурс]. – URL: <https://sber.pro/digital/publication/k-obshhemu-znamenatelyu-zachem-nuzhny-standarty-v-agile> (дата обращения: 16.06.2023).
535. Agile Alliance: The Agile Manifesto [Электронный ресурс]. – URL: <https://web.archive.org/web/20141027135802/http://www.agilealliance.org/the-alliance/the-agile-manifesto/> (дата обращения: 16.06.2023).
536. Agile Alliance [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.agilealliance.org/> (дата обращения: 16.06.2023).
537. Манифест agile все еще имеет вес? | Atlassian [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.atlassian.com/ru/agile/manifesto> (дата обращения: 16.06.2023).
538. ISO/IEC TR 24587:2021 Системная и программная инженерия. Гибкая методология разработки программного обеспечения. Соображения по гибкому внедрению - ФГБУ «Институт

- стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6875827> (дата обращения: 15.06.2023).
539. ISO/IEC TR 24587:2021 – Software and systems engineering — Agile development — Agile adoption considerations [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/79011.html> (дата обращения: 15.06.2023).
 540. ISO/IEC/IEEE 26515:2018 – Systems and software engineering — Developing information for users in an agile environment [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/70880.html> (дата обращения: 15.06.2023).
 541. ISO/IEC/IEEE 26515:2018 Системная и программная инженерия. Информация для пользователей в гибкой среде разработки [Электронный ресурс]. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6439696.aspx> (дата обращения: 15.06.2023).
 542. ISO/IEC TR 29119-6:2021 – Software and systems engineering — Software testing — Part 6: Guidelines for the use of ISO/IEC/IEEE 29119 (all parts) in agile projects [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/81293.html> (дата обращения: 15.06.2023).
 543. ISO/IEC TR 29119-6:2021 Системная и программная инженерия. Тестирование программного обеспечения. Часть 6. Руководящие указания по использованию ISO/IEC/IEEE 29119 (все части) в гибких проектах [Электронный ресурс]. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6865685.aspx> (дата обращения: 15.06.2023).
 544. ISO – Search – Agile [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/search.html?q=agile> (дата обращения: 15.06.2023).
 545. Agile Practices | PMI [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pmi.org/learning/featured-topics/agile> (дата обращения: 15.06.2023).
 546. Agile Practice Guide | PMI [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.agilealliance.org/wp-content/uploads/2021/02/AgilePracticeGuide.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).
 547. Agile Practice Guide | Project Management Institute [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/practice-guides/agile> (дата обращения: 15.06.2023).
 548. Agile standards whitepaper | BSI [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bsigroup.com/en-GB/our-services/developing-new-standards/agile-standards-whitepaper/> (дата обращения: 15.06.2023).
 549. Agile for Model-Based-Standards Development | NIST [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nist.gov/publications/agile-model-based-standards-development> (дата обращения: 15.06.2023).
 550. NIST Advanced Manufacturing Series 100-40 Agile for Model-Based-Standards Development [Электронный ресурс]. – URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ams/NIST.AMS.100-40.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).
 551. Отчет об исследовании Agile в России 2022 — статья в блоге ScrumTrek [Электронный ресурс]. – URL: <https://scrumtrek.ru/blog/agile-scrum/11200/otchet-issledovanie-agile-v-rossii-2022/> (дата обращения: 15.06.2023).
 552. Минпромторг и Росстандарт обновили Перспективный план стандартизации технологий Индустрии 4.0 [Электронный ресурс]. – URL: https://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!minpromtorg_i_rosstandart_obnovili_perspektivnyy_plan_standartizacii_tehnologiy_industrii_40 (дата обращения: 28.04.2023).
 553. О продолжении В России работы над регулированием технологий индустрии 4.0 – ФГБУ

«Институт стандартизации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gostinfo.ru/InformationOfStandardization/Details/2909> (дата обращения: 28.04.2023).

554. В России продолжат работу над регулированием технологий Индустрии 4.0 [Электронный ресурс]. – URL: https://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!v_rossii_prodolzhat_rabotu_nad_regulirovaniem_tehnologiy_industrii_40 (дата обращения: 28.04.2023).