

Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии».

Результаты и перспективы

Roadmap for the development of cross-cutting digital technology “New Manufacturing Technologies”: findings and prospects



А. И. Боровков (A. I. Borovkov),

к.т.н., профессор, проректор по перспективным проектам, руководитель Центра компетенций НТИ «Новые производственные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Ph.D. in Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Advanced Projects, Head of the National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)



О. И. Рождественский (O. I. Rozhdestvensky),

руководитель дирекции Центра компетенций НТИ «Новые производственные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Head of Administration of the National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)



К. В. Кукушкин (K. V. Kukushkin),

главный специалист отдела технологического и промышленного форсайта Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Senior Analyst of Technology and Industry Foresight Department, Computer-Aided Engineering Centre of Excellence, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)

doi 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011



Е. И. Павлова (E. I. Pavlova),

специалист отдела сопровождения проектов дирекции Центра компетенций НТИ «Новые производственные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Expert of Project Management Department, Administration of the National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)



А. Ю. Таршин (A. Yu. Tarshin),

заместитель руководителя дирекции Центра компетенций НТИ «Новые производственные технологии», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Deputy Head of Administration of the National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University)

Аннотация

В статье рассмотрены результаты разработки дорожной карты по сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии», выполненной Центром Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (далее — Центр НТИ СПбПУ). Дорожная карта направлена на формирование рамочных усло-

вий для поиска, отбора и целевой поддержки проектов по развитию новых производственных технологий.

В ходе разработки документа были проведены кабинетные и полевые аналитические исследования по формированию перечня субтехнологий, осуществлено прогнозирование с применением методологии форсайта, совместно с экспертным сообществом разработаны направления по реализации перспективных проектов.

В статье представлены основные результаты исследований, предложения и мероприятия, включенные в дорожную карту. Сформированные результаты стали основой для формирования государственной политики по поддержке развития новых производственных технологий на период до 2024 года.

Ключевые слова:

Цифровая экономика, новые производственные технологии, цифровой двойник, цифровое проектирование и моделирование, дорожная карта

Abstract

This article presents the results of a research project to design the roadmap for the development of a cross-

cutting digital technology named “New Manufacturing Technologies” in Russia. This project was carried out by the National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies based on the Institute of Advanced Manufacturing Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University in April–September 2019. The roadmap is intended to provide framework for selecting and supporting projects aimed at developing new manufacturing technologies.

The research project included desk reviews and field research to set up a list of subtechnologies, foresight studies and definition of future projects jointly with the expert community.

This article focuses on the results of research, proposals and areas of activity included in the roadmap. These results laid the foundations for the state policy to support the development of new manufacturing technologies to 2024.

Key words:

Digital Economy, Advanced Manufacturing Technologies, Digital Twin, Digital Design and Simulation, Roadmap

Введение

Сегодня одним из приоритетных направлений деятельности правительств ведущих стран мира является ускоренное развитие и внедрение целого ряда прорывных технологий в самых различных сферах экономики, в том числе в сфере материального производства — высокотехнологичной промышленности. Как правило, речь идет о новых производственных технологиях, искусственном интеллекте, машинном обучении, больших данных, промышленном интернете, робототехнике, аддитивных технологиях, виртуальной и дополненной реальности, блокчейне, квантовых технологиях, нейротехнологиях, беспроводной связи и др.

Россия в этом смысле не является исключением: по состоянию на 2019 год существует три основных инструмента государственной политики, которые в значительной мере затрагивают вопросы цифровой трансформации промышленности посредством развития новых производственных технологий:

- » Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации в рамках национального проекта «Наука» [1];
- » Национальная технологическая инициатива (НТИ) [2];
- » национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [3].

Цели национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», реализация которых предполагается до 1 января 2025 года:

- » «увеличение внутренних затрат на развитие цифровой экономики за счет всех источников (по доле в валовом внутреннем продукте страны) не менее чем в три раза по сравнению с 2017 годом;
- » создание устойчивой и безопасной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры высокоскоростной передачи, обработки и хранения больших объемов данных, доступной для всех организаций и домохозяйств;
- » использование преимущественно отечественного программного обеспечения государственными органами, органами местного самоуправления и организациями» [4].

Общий утвержденный объем финансирования (из всех источников) национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» в 2019–2024 годах составит 1627146 млн рублей [4].

Для достижения поставленных целей программа предусматривает реализацию следующих федеральных проектов: «Нормативное регулирование цифровой среды», «Информационная инфраструктура», «Кадры для цифровой экономики», «Информационная безопас-

ность», «Цифровые технологии», «Цифровое государственное управление».

В рамках федерального проекта «Цифровые технологии» предполагается достижение следующей цели: «Увеличение внутренних затрат на развитие цифровой экономики за счет всех источников (по доле в валовом внутреннем продукте страны) не менее чем в три раза по сравнению с 2017 годом» [5].

Её предполагается достичь за счет формирования институциональной среды для развития исследований в области цифровой экономики, обеспечения коммерциализации наиболее перспективных решений, развития технологических заделов по 9 направлениям «сквозных» цифровых технологий и создания системы финансирования проектов по разработке, развитию цифровых технологий, а также платформенных решений, что также включает инструменты венчурного финансирования и поддержку институтов развития. Общий объем финансирования федерального проекта «Цифровые технологии» с 2019 по 2024 год составит 282 194,89 млн рублей [4].

Куратором федерального проекта является М.А. Акимов, Заместитель Председателя Правительства Российской Федерации, руководителем проекта — Е.Ю. Кисляков, Заместитель Министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, администратором проекта — М.М. Насибулин, директор департамента координации и реализации проектов по цифровой экономике Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Работа по реализации федерального проекта в рамках АНО «Цифровая экономика» ведется центром компетенций «Цифровые технологии», сформированным в ГК «Росатом» и ГК «Ростех». Соруководителями центра компетенций «Цифровые технологии» являются К.Б. Комаров, первый заместитель генерального директора — директор Блока по развитию и международному бизнесу ГК «Росатом», и В.Ю. Бровко, директор по особым поручениям ГК «Ростех».

Также в рамках АНО «Цифровая экономика» сформирована рабочая группа по реализации федерального проекта, руководителем которой является А.Б. Повалко, генеральный директор, председатель Правления АО «РВК».

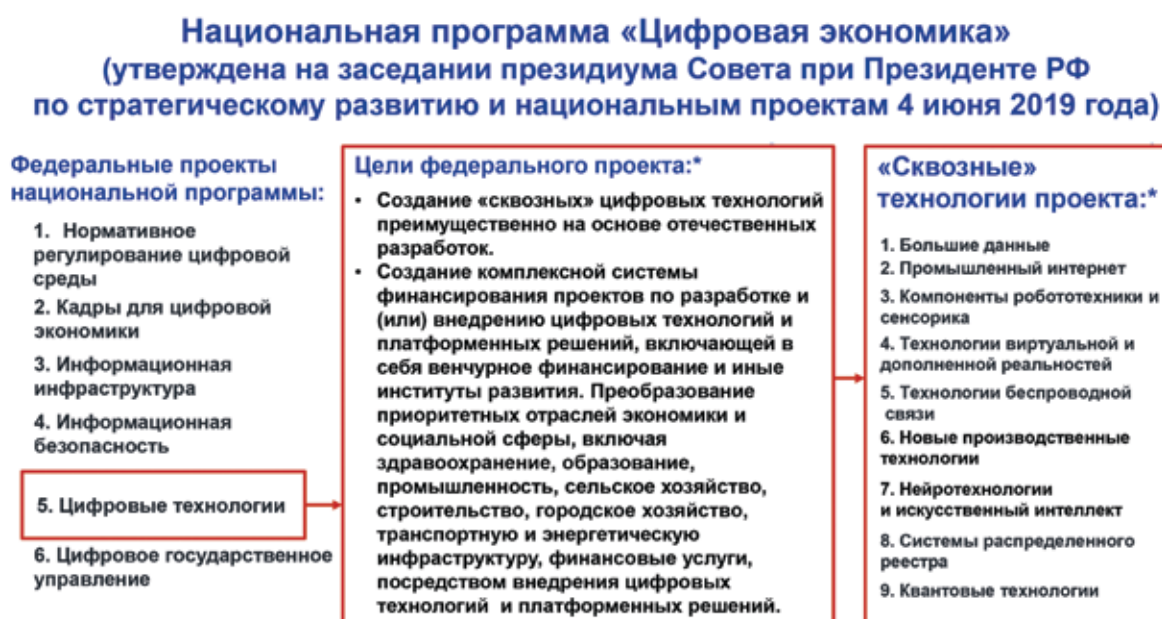
В рамках реализации федерального проекта в 2019 году были разработаны дорожные карты по каждой из 9 «сквозных» цифровых технологий (см. Рисунок 1) [6, 7].

Отбор операторов разработки дорожных карт был осуществлен на конкурсной основе; организатором конкурса, проведенного в период с 4 по 26 марта 2019 года, стала ГК «Росатом» [8].

30 марта 2019 года конкурсная комиссия ГК «Росатом» объявила Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (далее — СПбПУ) победителем в конкурсном отборе на разработку дорожной карты по «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» (далее — ДК СЦТ НПТ).

В числе конкурентов СПбПУ в борьбе за право на разработку соответствующей дорожной карты высту-

Рисунок 1 — Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации»: ключевые направления



* - по данным паспорта национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденного 28 мая 2019 года

Источник: Центр НТИ СПбПУ по материалам [6, 7]

пили такие организации, как МГУ им. М.В. Ломоносова, Университет «Иннополис», МГТУ «СТАНКИН», РФЯЦ-ВНИИЭФ и др.

Преимуществами СПбПУ стали компетенции в области создания, развития и применения новых производственных технологий, неоднократное участие в высокотехнологичных проектах, значительный опыт практической деятельности по формированию стратегических документов и дорожных карт.

1. Методология и процесс разработки дорожной карты по развитию «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»

Согласно Атласу «сквозных» технологий цифровой экономики России, разработанному ГК «Росатом», под «сквозной» цифровой технологией понимается «крупное направление научно-технологического развития» [9]. Согласно определению Центра НТИ СПбПУ, это цифровые технологии, которые оказывают наиболее существенное влияние на развитие сразу нескольких отраслей и/или рынков.

Дорожная карта по «сквозной» цифровой технологии» (далее — СЦТ) является рамочным документом, предназначенным для поиска, отбора и целевой поддержки проектов по соответствующему направлению. Согласно определению помощника Президента Российской Федерации А.Р. Белоусова, «Дорожная карта — это ключевой управленческий документ, в соответствии с которым будет организована поддержка развития «сквозных» технологий в течение ближайших нескольких лет» [10].

Процесс подготовки ДК СЦТ НПТ включал аналитическое обоснование, выделение приоритетных субтехнологий, формирование предложений по проектам и мероприятиям государственной поддержки, направленных на достижение технических характеристик и решение технологических задач, которые были определены в дорожной карте. Помимо этого, процесс разработки ДК СЦТ НПТ включал постоянную работу и взаимодействие с экспертами и бизнесом-сообществом.

В рамках ежегодной пресс-конференции 20 декабря 2018 года Президент Российской Федерации В.В. Путин отметил, что «... нам нужен прорыв. Нужно прыгнуть в новый технологический уклад — без этого у страны нет будущего. И это принципиальный вопрос. Нужно сконцентрировать наши силы» [11]. В соответствии с этой установкой, целью дорожной карты является:

- » разработка и развитие прорывных технологий СЦТ НПТ как основы для технологического лидерства;
- » развитие отечественных технологий до мирового уровня, внедрение и апробация производственных

технологий, стимулирование спроса на НПТ в высокотехнологичных отраслях промышленности;

- » устранение барьеров (нормативно-технических, научных, технологических, кадровых, финансовых и др.).

Методология подготовки дорожной карты включала кабинетные и полевые аналитические исследования.

В результате кабинетного аналитического исследования была сформирована мощная теоретическая база — исследовано более 230 источников:

- » произведены сбор и анализ статистической информации (данных Федеральной службы государственной статистики и иных источников);
- » проанализированы в соответствии с требованиями технического задания нормативные и иные регламентирующие документы;
- » осуществлен поиск, отбор, систематизация и анализ лучших международных и российских решений по разработке, развитию и применению субтехнологий¹ новых производственных технологий;
- » на основе открытых источников исследованы мировой и российский рынки новых производственных технологий, конкурентная среда.

Помимо этого, были проведены полевые аналитические исследования в форме опросов и экспертных мероприятий:

- » онлайн-анкетирование (в период с 5 апреля по 23 мая 2019 года, в анкетировании участвовали 135 экспертов), в рамках которого проведена приоритизация технологий, сформулированы барьеры, определены потребности российских высокотехнологичных предприятий в решениях по направлению «Новые производственные технологии»;
- » очное анкетирование (17 апреля 2019 года, в анкетировании участвовали 39 экспертов), в рамках которого проведена оценка конкурентной среды, российских рынков по профильным субтехнологиям и спроса отраслей экономики на профильные субтехнологии;
- » очные экспертные сессии:
 - первая экспертная сессия (17 апреля 2019 года, в экспертной сессии участвовали 109 экспертов): в качестве вводных материалов для сессии использовались данные, полученные в ходе онлайн-анкетирования экспертов в области «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» и составляющих её субтехнологий;
 - вторая экспертная сессия (22 апреля 2019 года, в экспертной сессии участвовали 52 эксперта):

¹ В соответствии с Атласом «сквозных» технологий цифровой экономики России, субтехнология — это группа технологий, включенная в состав «сквозной» цифровой технологии [9].

сессия прошла в формате вебинара по обсуждению проекта дорожной карты по развитию СЦТ «Новые производственные технологии»;

- третья экспертная сессия (26 апреля 2019 года, в экспертной сессии участвовали 62 эксперта): обсуждение итогов подготовки и уточнение перечня мероприятий дорожной карты по направлению развития СЦТ «Новые производственные технологии». Было высказано более 50 предложений по организации конкретных мероприятий, рекомендованных экспертами для внесения в ДК СЦТ «Новые производственные технологии».

Следует отметить, что работы по проекту были осуществлены в крайне сжатые сроки — разработка ДК СЦТ НПТ заняла около двух месяцев.

Презентация разработанного проекта ДК СЦТ НПТ прошла в формате круглого стола 23 мая 2019 года

на конференции «Цифровая индустрия промышленной России» (ЦИПР-2019). 24 мая 2019 года на заседании Наблюдательного совета АНО «Цифровая экономика» проректор по перспективным проектам СПбПУ, руководитель работ по разработке ДК СЦТ НПТ А. И. Боровков представил разработанную Центром НТИ СПбПУ дорожную карту на экспертизу, по итогам которой были определены дальнейшие шаги по реализации проекта.

2. Результаты исследований по разработке дорожной карты по развитию «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»

Для разработки ДК СЦТ НПТ были предварительно сформированы 7 субтехнологий (см. Таблицу 1). Оценка, отбор и анализ субтехнологий проводились на основе большого количества документов и материалов [9, 12–25].

Таблица 1 — Предварительный список субтехнологий, рассматриваемых в рамках дорожной карты по развитию «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»

№	Субтехнология	Элементы технологической карты субтехнологий
1.	Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом	Компьютерное проектирование (Computer-Aided Design, CAD), математическое моделирование, компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE, и High Performance Technical Computing, HPTC)/имитационное моделирование и суперкомпьютерный инжиниринг, компьютерная оптимизация (Computer-Aided Optimization, CAO), технологическая подготовка производства (Computer-Aided Manufacturing, CAM), технологии управления данными о продукте (Product Data Management, PDM), технологии управления жизненным циклом продукта (Product Lifecycle Management, PLM), «цифровые двойники» (Digital Twins)
2.	Новые материалы	Технологии разработки и производства материалов с заданными свойствами; материалы и сырье для новых производственных технологий
3.	Аддитивные технологии	Технологии 3D- и 4D-печати (3D printing; 4D printing): системы компьютерного проектирования для аддитивных технологий (Design For Additive Manufacturing, DFAM) и инженерного анализа (Computer Aided Engineering, CAE), технологическая подготовка производства для аддитивного производства, 3D- и 4D-принтеры, технологии постфинишной обработки
4.	Технологии «умного» производства	«Умные» производственные линии (Intelligent/Smart Production), «умная» робототехника, носимые устройства с встроенными технологиями дополненной/виртуальной реальности (wearable devices with augmented reality/virtual reality capability)
5.	Технологии контроля и управления производством	Системы управления предприятием (Enterprise Resource Planning, ERP), системы управления производством (Manufacturing Execution Systems, MES), системы управления технологическим процессом (автоматизированные системы управления технологическим процессом, АСУ ТП): человеко-машинный интерфейс (Human-Machine Interface, HMI), SCADA-системы, программируемые логические контроллеры, исполнительные устройства
6.	Гибридные и гибкие производственные линии, быстрое масштабирование	Гибкие, реконфигурируемые и модульные машины, неконвенциональные производственные технологии (Non-Conventional Machining)
7.	Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики	Платформы для интеграции бизнес-процессов в инжиниринге, производстве и логистике

Источник: Центр НТИ СПбПУ

Сформированные субтехнологии были апробированы в рамках полевых аналитических исследований.

Полевые исследования состояли из нескольких этапов, участниками которых стали 236 экспертов — представителей 162 российских организаций (см. Рисунок 2). Обеспечить сбалансированную экспертизу ДК СЦТ НПТ позволил учет трех важных условий, заложенных в основу формирования экспертной группы.

Первое условие — необходимость интеграции усилий главных участников цифровой экономики: научного сообщества (83 эксперта), бизнес-сообщества (146 экспертов) и государства (7 экспертов).

Второе условие — высокие требования к профессиональным компетенциям экспертов: более половины участников обладают ученой степенью, являются представителями руководящего звена организаций, инженерно-техническими специалистами, учеными-исследователями.

Третье условие — отражение интересов различных сфер промышленного производства: в разработке ДК приняли участие представители более 12 отраслей (см. Рисунок 3).

Первым этапом полевых аналитических исследований стал экспертный опрос в формате онлайн-анкетирования. С 5 по 21 апреля 2019 года в опросе приняли участие 127 экспертов. Вопросы анкеты были направлены на формирование теоретического заде-

ла, основу которого составили оценки представителей экспертного сообщества относительно ключевых проблем развития НПТ. Использование в анализе результатов как количественных, так и качественных методов позволило выявить наиболее распространенные и полярные мнения экспертов, определить взаимозависимость между переменными, сформировать кластеры ответов, а также наиболее полный спектр вариантов решений.

2.1. Результаты онлайн-анкетирования.

Состояние новых производственных технологий в России в 2019 году

По итогам онлайн-анкетирования, проведенного Центром НТИ СПбПУ для разработки ДК СЦТ НПТ, были получены уникальные данные, характеризующие актуальный уровень разработки и распространения новых производственных технологий в России. Анкетирование позволило составить перечень наиболее значимых субтехнологий, ранжировать их в соответствии с потребностями российских предприятий, а также определить уровень зрелости отечественных технологических решений и оценить готовность компаний к цифровой трансформации. Эксперты высказали мнение относительно барьеров, которые необходимо преодолеть для успешной реализации мероприятий по развитию НПТ, а также назвали предполагаемые эффекты, достижению кото-

Рисунок 2 — Компании и организации, принимавшие участие в разработке дорожной карты по развитию «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»



Источник: Центр НТИ СПбПУ

Рисунок 3 — Профиль экспертов — участников онлайн-анкетирования



Источник: Центр НТИ СПбПУ

рых будет способствовать разработка НПТ. В результате анализа полученной информации удалось прийти к следующим выводам.

Что касается уровня готовности российских технологий (УГТ)², оценки экспертов преимущественно сосредоточились в диапазоне от УГТ-3 до УГТ-9 (по шкале от 1 до 9), наиболее часто эксперты присваивали 6-й уровень «зрелости» российским НПТ (17% ответов). Кроме того, 74% экспертов заявили, что существует значительный разрыв в темпах развития субтехнологий СЦТ НПТ в России и за рубежом: отставание отечественных решений на 5–10 лет (см. Рисунок 4).

Среди основных препятствий на пути внедрения НПТ в России, которые необходимо преодолеть к 2024 году, были названы следующие группы барьеров:

- » в области кадрового обеспечения, знаний и образования — 31%;
- » в области систем управления, бизнес-моделей — 22%;
- » в области стандартов и нормативного правового обеспечения — 22%;

- » в области финансов — 21%;
- » барьеры, связанные со спецификой культуры профессиональной деятельности, мотивацией — 18%;
- » барьеры, связанные с недостаточным уровнем конкуренции — 10%;
- » износ или нехватка производственных ресурсов — 9%;
- » социально-политические факторы — 3%.

В числе ожидаемых результатов внедрения СЦТ НПТ, самым значимым, по мнению респондентов, станет сокращение времени разработки/производства продукции (см. Рисунок 5).

Кроме этого, немаловажными эффектами были признаны возможность снижения финансовых издержек, условия для производства продуктов с принципиально новыми потребительскими свойствами, а также рост качества продукции, повышение гибкости производства, внедрение новых бизнес-моделей.

2.2. Результаты очного анкетирования. Перспективы и конкурентный потенциал новых производственных технологий в России к 2024 году

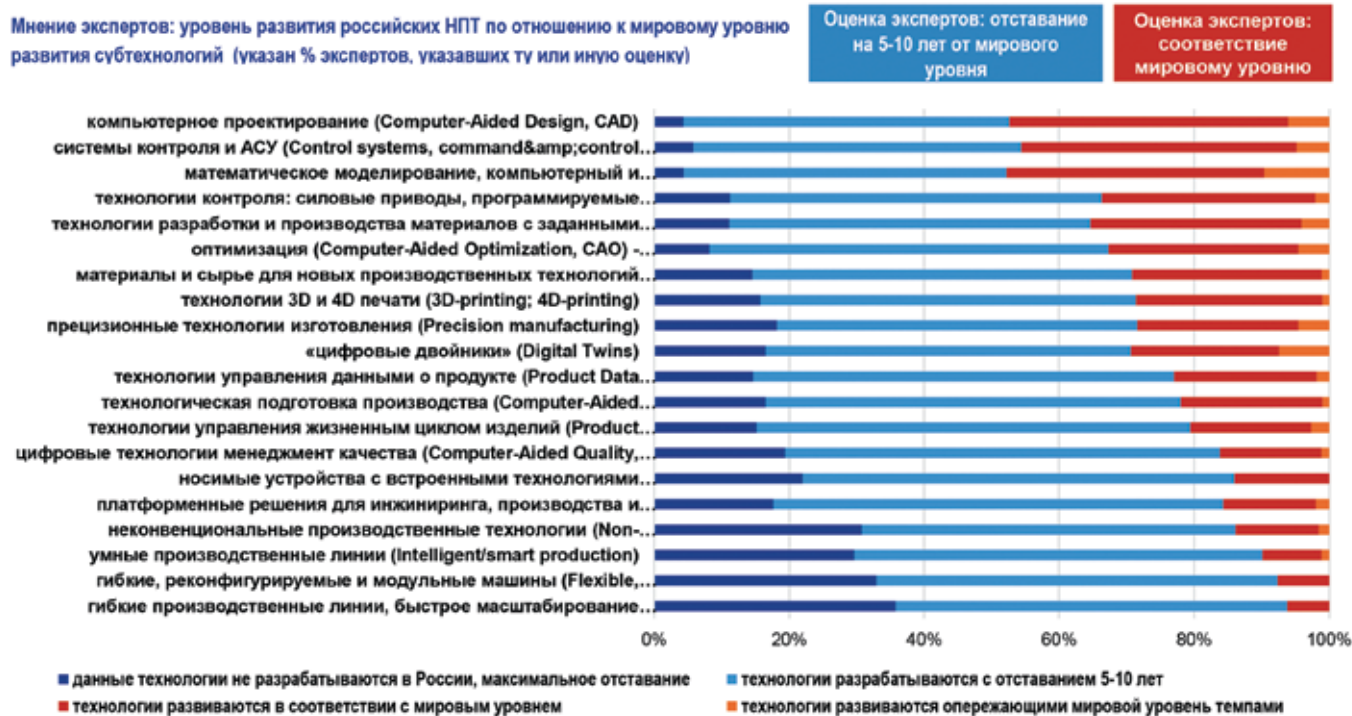
Вторым этапом полевых исследований стал экспертный опрос в формате очного анкетирования экспертов, проведенный в рамках первой экспертной сессии 17 апреля 2019 года. В опросе приняли участие 39 экс-

² Уровень готовности технологий – характеристика соответствия конкретной технологии уровню ее зрелости от идеи до серийного производства, выражающаяся в определенном научном, научно-техническом или производственном результате, измеряемая соответствующими показателями результативности [26].

пертов — представителей таких предприятий, вузов и научных организаций, как ГК «Росатом», ОК «Русал», ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация», ПАО «Ил», ЦИАМ им. П.И. Баранова, ИМАШ РАН им. А.А.

Благодарова, Autodesk, Dassault Systèmes, Томский политехнический университет, Новосибирский государственный технический университет, Волгоградский государственный технический университет и др.

Рисунок 4 — Уровень развития российских новых производственных технологий по отношению к мировому уровню



Источник: результаты экспертного опроса в формате онлайн-анкетирования в рамках разработки ДК СЦТ НПТ

Рисунок 5 — Области применения и ожидаемые результаты применения СЦТ НПТ

Значимость эффектов внедрения СЦТ НПТ
(оценка экспертами, указан средний балл от 1 до 5, названный экспертами)



Области применения

1. Разработка высокотехнологичной глобально конкурентоспособной продукции
2. Новые материалы в обрабатывающем производстве
3. Аддитивные технологии в обрабатывающем производстве
4. Технологии «умного» производства
5. Гибридные и гибкие производственные линии, быстрое масштабирование
6. Технологии контроля и управления производством
7. Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики
8. Моделирование технологических процессов добычи полезных ископаемых вне прямой видимости рабочей зоны
9. Объемное 3D моделирование месторождений, расчет проницаемости горных пород по их 3D-изображениям
10. Цифровые платформы для интеграции этапов добычи полезных ископаемых
11. Автоматизированные системы для управления информационными потоками
12. Аддитивные технологии для ремонта и обслуживания транспорта
13. Цифровые платформы для управления транспортными средствами
14. Умные технологии для сохранности грузов – датчики
15. Аддитивные технологии в нейрохирургии, челюстно-лицевой хирургии, онкологической практике, стоматологии, протезировании
16. Создание цифровых моделей человека разного уровня: морфологических, структурных, механических, физиологических, поведенческих

Источник: результаты экспертного опроса в формате онлайн-анкетирования в рамках разработки ДК СЦТ НПТ

В рамках опроса респондентам предложили оценить конкурентность рынков по отдельным субтехнологиям НПТ в 2019 и 2024 годах.

По результатам экспертной оценки практически все рынки по «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» в настоящий момент не обладают высокой конкурентностью, однако в 2024 году эта ситуация изменится, конкуренция на рынках вырастет. При этом наиболее динамичной конкуренция будет на рынке платформенных решений и на рынке цифрового проектирования, моделирования и управления жизненным циклом, тогда как наименьшая конкуренция будет на рынке технологий «умного» производства (см. Таблицу 2).

Также в рамках опроса эксперты оценили спрос на субтехнологии «сквозной» технологии «Новые производственные технологии» на различных потребительских рынках. Результаты этой оценки достаточно предсказуемы, однако есть специфика по некоторым субтехнологиям.

По результатам оценки наиболее высокий спрос зафиксирован на рынках, связанных с обрабатывающими производствами, добычей полезных ископаемых и строительством (см. Таблицу 3).

При подробном рассмотрении самих блоков субтехнологий отмечается наименьший суммарный балл по оценке рыночной потребности в технологиях по блокам «Аддитивные технологии» и «Гибридные и гибкие производственные линии» (см. Таблицу 4).

Таблица 2 — Интенсивность конкуренции на рынках субтехнологий по результатам экспертной оценки (чем выше значение в ячейке, тем выше конкурентный потенциал рынка)

	2019	2024
Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом	126	156
Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики	108	160
Новые материалы	96	138
Аддитивные технологии	96	143
Технологии «умного» производства	86	130
Технологии управления производством	111	147
Гибридные и гибкие производственные линии, быстрое масштабирование	74	136

Источник: результаты экспертного опроса в формате очного анкетирования 17 апреля 2019 года в рамках разработки ДК СЦТ НПТ

Таблица 3 — Приоритетность технологий ДК СЦТ НПТ в применении к различным отраслям экономики (чем выше значение, тем выше спрос на субтехнологии на рынке)

	Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом	Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики	Новые материалы	Аддитивные технологии	Технологии «умного» производства	Технологии управления производством	Гибридные и гибкие производственные линии, быстрое масштабирование
Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	75	88	90	62	103	116	86
Деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений	77	76	89	76	75	82	67

Таблица 3 (продолжение) — Приоритетность технологий ДК СЦТ НПТ в применении к различным отраслям экономики (чем выше значение, тем выше спрос на субтехнологии на рынке)

	Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом	Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики	Новые материалы	Аддитивные технологии	Технологии «умного» производства	Технологии управления производством	Гибридные и гибкие производственные линии, быстрое масштабирование
Строительство	163	146	168	132	124	127	120
Образование	108	99	74	81	77	75	72
Деятельность финансовая и страховая	119	110	55	49	73	85	66
Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг	114	105	126	117	95	99	90
Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания	84	112	63	62	65	85	68
Деятельность в области информации и связи	143	140	97	78	97	115	99
Обрабатывающие производства	162	168	146	142	156	166	153
Добыча полезных ископаемых	139	146	116	97	115	133	115
Деятельность профессиональная, научная и техническая	141	125	112	110	101	102	99
Государственный сектор	98	100	59	59	75	89	66
Недвижимость	101	98	67	63	66	71	60
Транспорт и хранение	134	153	118	106	123	131	99
ЖКХ	103	110	82	65	83	88	69
Оптовая и розничная торговля	82	109	58	49	72	78	69
Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха	134	127	98	88	109	123	99
Другие отрасли	70	69	64	58	54	62	55

Источник: результаты экспертного опроса в формате очного анкетирования 17 апреля 2019 года в рамках разработки ДК СЦТ НПТ

Таблица 4 — Суммарная оценка потребности в отдельных блоках технологий по всем рынкам (чем выше значение, тем выше спрос на субтехнологии на рынке)

	Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом	Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики	Новые материалы	Аддитивные технологии	Технологии «умного» производства	Технологии управления производством	Гибридные и гибкие производственные линии, быстрое масштабирование
Общая оценка спроса на технологии по отраслям экономики	2047	2081	1682	1494	1663	1827	1552

Источник: результаты экспертного опроса в формате очного анкетирования 17 апреля 2019 года в рамках разработки ДК СЦТ НПП

При этом наиболее «универсальными» блоками являются «Платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики», а также «Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом продукта».

Можно предположить, что рынки новых материалов и аддитивных технологий сильно зависят от спроса на других рынках субтехнологий, например, от принятия тех или иных решений в рамках проектирования или производства продукции (например, выбор способа изготовления).

В рамках опроса эксперты оценивали объем рынков субтехнологий в России на текущий момент, а также формировали прогноз до 2024 года (см. Рисунок 6).

По экспертной оценке, наибольший объем в настоящий момент у рынка гибких и гибридных производственных линий и быстрого масштабирования — около 250 млн долл. в 2019 году, на втором месте по объему рынка — технологии контроля и управления производством — 169 млн долл. и новые материалы — 141 млн долл. По рынку гибких и гибридных производственных линий и быстрого масштабирования отмечается наиболее высокий прогноз на 2024 год — до 1 054 млн долл., далее следуют — новые материалы (839 млн долл.), технологии «умного» производства — 703 млн долл. и аддитивные технологии (590 млн долл.).

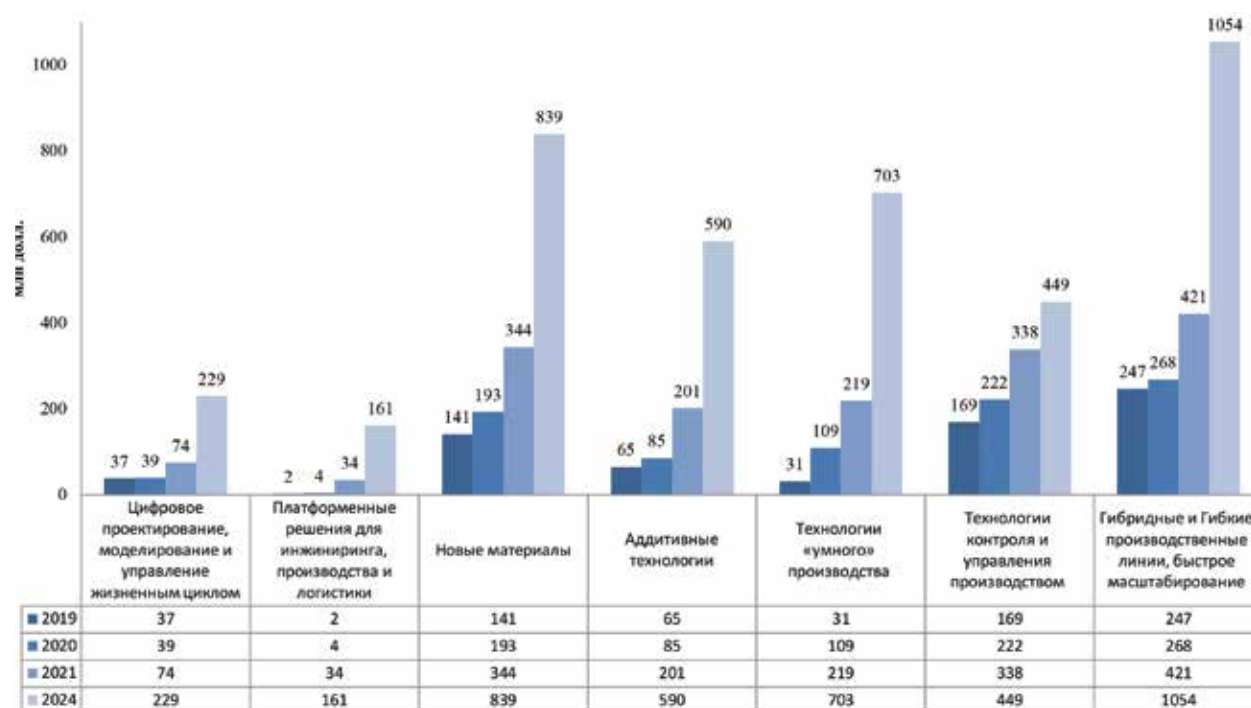
Следует отметить, что субтехнологии цифрового проектирования, моделирования и управления жизненным циклом, а также платформенные решения для инжиниринга, производства и логистики имеют наименьший текущий объем рынка: 37 и 2 млн долл. соответственно и самую низкую прогнозную оценку — 229 млн долл. и 161 млн долл. соответственно.

При этом именно эти технологии оценены экспертами как наиболее востребованные в отраслях экономики и как наиболее конкурентные в 2024 году.

Конечно, такая оценка связана с тем, что как цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом, так и создание специальных платформ требует уникальных компетенций высокопрофессиональных команд. Кроме того, достаточно очевидно, что цифровое проектирование выступает как один из основных компонентов в деятельности по созданию любых продуктов, изделий, машин, конструкций, систем, приборов, сооружений и т.д., то есть представлено во всех высокотехнологичных отраслях, однако выделить и оценить вклад цифрового проектирования очень сложно, этот вклад является рассредоточенным по отраслям. Дополнительно, полученные на основе цифрового проектирования решения и разработанная продукция, как правило, применяются, эффективно масштабируются и тиражируются в рамках развития других субтехнологий НПП. Например, сложно представить, что лидеры прогноза «Новые материалы» и «Гибкие и гибридные производственные линии и быстрое масштабирование» могут быть эффективно применены без субтехнологии «Цифровое проектирование, моделирование и управление жизненным циклом».

При относительно умеренных оценках экспертами объема профильных рынков следует отметить наиболее высокие темпы роста субтехнологий цифрового проектирования, моделирования и управления жизненным циклом, а также платформенных решений для инжиниринга, производства и логистики среди остальных субтехнологий направления. Так, ожидается, что к 2024 году объ-

Рисунок 6 — Объем рынков по технологиям ДК СЦТ НПТ в 2019–2024 годах, млн долл. (экспертная оценка)



Источник: результаты экспертного опроса в формате очного анкетирования 17 апреля 2019 года в рамках разработки ДК СЦТ НПТ

ем рынка по первой субтехнологии вырастет в 6,2 раза, тогда как по второй субтехнологий — в 80 раз!

Заключение. Итоги проекта разработки дорожной карты по «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии»

Одна из целей работ по формированию дорожной карты, исполнителем которых выступил Центр НТИ СПбПУ, состояла в том, чтобы определить траектории развития НПТ в России и создать условия для системной работы по совершенствованию существующих подходов и решений в сфере НПТ. Одним из важнейших результатов работы по подготовке ДК СЦТ НПТ является выработка конечного перечня субтехнологий.

В ходе заседания Наблюдательного совета АНО «Цифровая экономика» 24 мая 2019 года, состоявшегося в рамках конференции «Цифровая индустрия промышленной России», в состав «сквозных» цифровых технологий и субтехнологий НПТ были внесены изменения.

Так, было пересмотрено решение о выделении таких «сквозных» цифровых технологий, как большие данные и промышленный интернет в качестве самостоятельных. СЦТ «Большие данные» была включена в предметные области дорожных карт «Технологии беспроводной связи» и «Нейротехнологии и искус-

ственный интеллект», а СЦТ «Промышленный интернет» — в дорожные карты «Компоненты робототехники и сенсорики», «Технологии беспроводной связи», «Нейротехнологии и искусственный интеллект» и «Новые производственные технологии».

Таким образом, в итоговый вариант ДК СЦТ НПТ были включены разделы, связанные с мероприятиями по развитию субтехнологии «платформы промышленного интернета» (на основе материалов, подготовленных Национальным центром информатизации в рамках разработки дорожной карты по развитию СЦТ «Промышленный интернет»). Кроме того, в ДК СЦТ НПТ было учтено направление «Манипуляторы и технологии манипулирования», разработанное Университетом «Иннополис» в рамках дорожной карты «Компоненты робототехники и сенсорики». При этом из ДК СЦТ НПТ были исключены субтехнологии «новые материалы» и «аддитивные технологии».

В результате экспертного обсуждения в качестве ключевых компонентов СЦТ НПТ были зафиксированы уточненные «интегральные» субтехнологии:

1. **Цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции (Smart Design)** — технологии, обеспечивающие реализацию концепции передового цифрового «умного» проектирования, драйвером кото-

рых выступает цифровой двойник (Digital Twin), а также обеспечивающие исследование поведения материалов, физико-механических и технологических процессов, машин и конструкций на основе математических моделей разных классов и уровней сложности (в самых общих случаях описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных).

2. Технологии «умного» производства (Smart Manufacturing) — технологии, обеспечивающие реализацию концепции «умного» производства: технологическая подготовка и реализация производственного процесса с минимальным участием человека на основе данных PLM-системы, операционное управление технологическими процессами, производством, предприятием; технологическая подготовка и реализация производственного процесса для кастомизированной продукции широкой номенклатуры на основе гибких, реконфигурируемых и модульных машин, оборудования и робототехники.

3. Манипуляторы и технологии манипулирования — методы математического моделирования робототехнических систем как пространственных механических систем с голономными и неголономными связями, разработка программного обеспечения; программно-аппаратные средства взаимодействия с окружающей средой и объектами.

Еще одним результатом, имеющим принципиальное значение для совершенствования отечественных технологий, можно считать формирование перечня мероприятий, определяющего механизмы разработки и развития СЦТ НПТ. Предполагается, что реализация указанных мер позволит преодолеть существующие барьеры, благодаря чему станет возможным достижение целевых показателей развития технологий. Таким образом, последовательность шагов, предусмотренная для решения технологических задач в сфере НПТ, позволит осуществить переход от текущего уровня готовности российских НПТ и состояния высокотехнологичной промышленности к целевому видению, запланированному на 2024 год.

Разработка и внедрение субтехнологий, входящих в СЦТ НПТ, является необходимым условием для присутствия отечественных компаний на глобальных высокотехнологичных рынках, для которых характерны смещение «центра тяжести» в конкурентной борьбе на этап разработки высокотехнологичной продукции, повышение уровня её наукоёмкости, сокращение сроков вывода новой продукции на рынок, жёсткие ограничения по издержкам, высокие требования к потребительским характеристикам.

По результатам проведенных работ следует отметить высокую значимость для обеспечения прорыва технологии цифровых двойников (Digital Twin), которая

Основные блоки мероприятий ДК СЦТ НПТ в части развития субтехнологии «Цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции (Smart Design)»

Блок «Технологический прорыв 2024»

Разработаны и внедрены технологии создания цифровых двойников продуктов/изделий на основе $\approx 40\,000$ – $150\,000$ целевых показателей, обеспечивающие при экспертном сопровождении прохождение с первого раза физических и натурных испытаний (1 итерация).

Блок «Технологическое лидерство 2024»

Цифровая платформа разработки цифровых двойников (с параметрами: до $150\,000$ целевых показателей и ресурсных ограничений) обеспечивает технологический прорыв в 5 приоритетных отраслях, в 50 высокотехнологичных компаниях, сформирована национальная сетевая экосистема из 25 «зеркальных» инженеринговых центров, объединяющая 2 500 экспертов-пользователей, разработана платформа «цифровой сертификации».

Блок «Технологический паритет 2024»

Разработаны и внедрены платформенные решения для эксплуатационного мониторинга в 5 приоритетных отраслях промышленности, внедривших решения — 100. Разработана отечественная конкурентоспособная PLM-система «тяжёлого класса», внедрена в 5 приоритетных отраслях, включая отраслевую кастомизацию, внедрена в 25 высокотехнологичных компаниях, количество пользователей — 10 000. Отечественные MES- и ERP-системы внедрены в 5 приоритетных отраслях, включая отраслевую кастомизацию, в 1 000 высокотехнологичных компаниях (более 10 000 пользователей), количество роботов, задействованных в производстве, на 10 000 работников — 40 единиц.

Источник: ДК СЦТ НПТ

» ДОРОЖНАЯ КАРТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ РАЗВИТИЯ «СКВОЗНОЙ» ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ «НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

БЫЛА УТВЕРЖДЕНА 14 ОКТЯБРЯ 2019 ГОДА НА ЗАСЕДАНИИ ПРЕЗИДИУМА ПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ КОМИССИИ ПО ЦИФРОВОМУ РАЗВИТИЮ, ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ И УСЛОВИЙ ВЕДЕНИЯ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.

наиболее высоко оценена экспертами и является технологией-интегратором практически всех «сквозных» цифровых технологий и субтехнологий, выступает технологией-драйвером, обеспечивает технологические прорывы и позволяет высокотехнологичным компаниям переходить на новый уровень технологического и устойчивого развития на пути к промышленному лидерству на глобальных рынках.

В сравнении с традиционными подходами разработка изделий и продукции на основе технологии цифровых двойников может обеспечивать снижение временных, финансовых и иных ресурсных затрат до 10 раз и более. Фактически именно с помощью разработанных заранее цифровых двойников, или «цифровых двойников, сидящих в засаде» (А. И. Боровков), лидеры мировых высокотехнологичных рынков формируют «гарантированное зарезервированное развитие» (А. А. Аузан) [27]. В этом случае семейство цифровых двойников обеспечивают производство («материализацию цифрового двойника») и поставку продукции с конкурентными характеристиками в кратчайшие сроки в зависимости от возникающей конъюнктуры на глобальном высокотехнологичном рынке, реализуя триаду «технологический прорыв — технологический отрыв — технологическое лидерство/превосходство».

В целях совершенствования решений по субтехнологии «Цифровое проектирование, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции (Smart Design)» в ДК СЦТ НПТ включены меры по блокам с условными названиями:

- » «Технологический прорыв»,
- » «Технологическое лидерство» и
- » «Технологический паритет».

Помимо этого, предусмотрен ряд дополнительных мероприятий, призванных обеспечить наиболее рациональный и многосторонний подход к развитию НПТ в России:

- » создание 20 испытательных полигонов;

- » формирование 15 технологических стандартов в области СЦТ НПТ (по 3 субтехнологиям, в 5 отраслях);
- » разработка и внедрение методических рекомендаций подготовки технико-экономических обоснований проектов внедрения СЦТ НПТ (по 3 субтехнологиям в 5 отраслях);
- » разработка и применение 10 стратегий цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием, создающих спрос на СЦТ НПТ.

Кроме того, к значимым результатам разработки ДК СЦТ НПТ можно отнести определение механизмов поддержки развития СЦТ НПТ и расчет привязанных к ним ресурсов.

В качестве инструментов, обеспечивающих содействие перспективным проектам и инициативам, были выделены:

- » грантовая поддержка малых предприятий;
- » поддержка программ деятельности лидирующих исследовательских центров;
- » поддержка отраслевых решений;
- » поддержка разработки и внедрения промышленных решений;
- » поддержка региональных проектов;
- » поддержка компаний-лидеров;
- » предоставление субсидий кредитным организациям.

Общий объем планируемых инвестиций на реализацию ДК СЦТ НПТ составляет более 145,3 млрд руб., из которых около 69 млрд — из бюджетных средств, более 76 млрд — из внебюджетных средств.

Дорожная карта по направлению развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» была утверждена 14 октября 2019 года на заседании президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности. ☒

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опубликован паспорт национального проекта «Наука». <http://government.ru/info/35565/>
2. Национальная технологическая инициатива. <http://www.nti2035.ru/nti/>
3. Национальный проект «Цифровая экономика». <http://static.government.ru/media/files/3b1AsVA1v3VziZip5VzAY8RTcLEbdCct.pdf>
4. Паспорт национального проекта Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». https://digital.gov.ru/uploaded/files/natsionalnaya-programma-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii_NcN2n00.pdf
5. Президент определил цели и задачи национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». <http://d-russia.ru/prezident-opredelil-tseli-i-zadachi-natsionalnoj-programmy-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii.html>
6. Паспорт федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика» Российской Федерации. <https://digital.gov.ru/uploaded/files/pasport-federalnogo-proekta-tsifrovyye-tehnologii.pdf>
7. Цифровые технологии. <https://data-economy.ru/science>
8. Сквозные цифровые технологии получают дорожные карты и финансирование. <https://ria.ru/20190131/1550213831.html>
9. Атлас сквозных технологий цифровой экономики России/А.Г. Макушкин, Е.А. Осоченко. — М.: АО «Гринатом». 2019. — 372 с. — <http://www.energoatlas.ru/wp-content/uploads/2019/03/Атлас-сквозные-технологии-цифровой-экономики-России.pdf>
10. Объявлены конкурсы на разработку дорожных карт по «сквозным» цифровым технологиям. <https://digital.gov.ru/ru/events/38810/>
11. Путин: нам нужен прорыв. https://www.gazeta.ru/business/news/2018/12/20/n_12438241.shtml
12. План мероприятий («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) НТИ, одобрен на заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России (протокол от 14 февраля 2017 г. № 1). http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/02_february/15/Dorozhnaya_karta_TechNet.pdf
13. План мероприятий («дорожная карта») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Технет» (передовые производственные технологии), утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 марта 2018 г. № 482-р. http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/05_may/08/0001201804020044.pdf
14. Центр компетенций НТИ по направлению «Новые производственные технологии». https://www.rvc.ru/eco/overcoming_technological_barriers/competence_centers_nti/144438/
15. Протокол № 2 заседания Конкурсной комиссии по отбору получателей грантов на государственную поддержку центров НТИ на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций от 22 декабря 2017 г. https://www.rvc.ru/nti/centers/status1/protocol_22122017.pdf
16. A Report by the Subcommittee on Advanced Manufacturing Committee on Technology of the National Science & Technology Council Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing. — 2018. — 40 p.
17. Industrie 4.0 Working Group Germany Market Report and Outlook. Germany Trade and Invest. — 2018. — 16 p.
18. Made in China 2025. Institute for Security & Development Policy Report. — 2018. — 9 p.
19. White Paper: Technology and Innovation for the Future of Production: Accelerating Value Creation. World Economic Forum. — 2017. — 38 p.
20. Queensland Advanced Manufacturing 10-Year Roadmap and Action Plan. State of Queensland, Department of State Development, Manufacturing, Infrastructure and Planning. — 2018. — 44 p.
21. Exponential technologies in manufacturing. Deloitte Development LLC. — 2018. — 64 p.
22. Advanced Technologies Initiative Manufacturing & Innovation. Deloitte Touche Tohmatsu Limited. — 2015. — 84 p.
23. Salatin C., Solomon C., Baranda J. S., Chanal H. Analysis on current and future capabilities requirements of Key Enabling Technologies (KETs) in Advanced Manufacturing. — 2014. — 19 p.
24. Sheppard B., Shaw C., Williams B. et al. Factory of the Future. Issue One. McKinsey & Company. — 2014. — 32 p.
25. Roadmap for cross-cutting KETs activities in Horizon 2020. European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. — 24 p.
26. Методика определения уровней готовности технологии в рамках проектов федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». http://fcpir.ru/upload/medialibrary/955/gt_57_14vn_metodika-ugt-_002_.pdf
27. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки//Цифровая трансформация экономики и промышленности: сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, 20–22 июня 2019 г. /под ред. А.В. Бабкина. — СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. — 780 с.

REFERENCES

1. Identification summary of the "Science" National Project published. Available at: <http://government.ru/info/35565/>
2. National Technology Initiative. Available at: <http://www.nti2035.ru/nti/>
3. "Digital Economy" National Project. Available at: <http://static.government.ru/media/files/3b1AsVA1v3Vzi5VzAY8RTcLEbdCct.pdf>
4. Identification summary of the "Digital Economy" National Project. Available at: https://digital.gov.ru/uploaded/files/natsionalnaya-programma-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii_NcN2n00.pdf
5. President defined the goals and objectives of the "Digital Economy of the Russian Federation" National Program. Available at: <http://d-russia.ru/prezident-opredelil-tseli-i-zadachi-natsionalnoj-programmy-tsifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federatsii.html>
6. Identification summary of the "Digital Technologies" Federal Project of the "Digital Economy of the Russian Federation" National Program. Available at: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/pasport-federalnogo-proekta-tsifrovyie-tehnologii.pdf>
7. Digital technologies. Available at: <https://data-economy.ru/science>
8. Cross-cutting digital technologies to receive roadmaps and funding. Available at: <https://ria.ru/20190131/1550213831.html>
9. Makushkin A., Osochenko E. Atlas skvoznykh tekhnologii tsifrovoy ekonomiki Rossii [Russia's digital economy cross-cutting technologies atlas]. Moscow, Greenatom, 2019, 372 p. Available at: <http://www.energoatlas.ru/wp-content/uploads/2019/03/Атлас-сквозные-технологии-цифровой-экономики-России.pdf>
10. Calls for bids to develop roadmaps for cross-cutting digital technologies announced. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/events/38810/>
11. Putin: We need a breakthrough. Available at: https://www.gazeta.ru/business/news/2018/12/20/n_12438241.shtml
12. The Technet (Advanced Manufacturing Technology) Roadmap of the National Technology Initiative. Available at: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/02_february/15/Dorozhnaya_karta_TechNet.pdf
13. Roadmap to enhance legislation and reduce administrative barriers in order to ensure the implementation of the Technet (Advanced Manufacturing Technologies) focus area activities approved by the Government of the Russian Federation Executive Order of 23 March 2018 no. 482-p. Available at: http://www.nti2035.ru/documents/docs/NDK_tech-net.pdf
14. Advanced Manufacturing Technologies Center of the National Technology Initiative. Available at: https://www.rvc.ru/eco/overcoming_technological_barriers/competence_centers_nti/144438/
15. Minutes No. 2 of the meeting of the Tender Committee for the selection of recipients of grants for state support of NTI centers on the basis of educational institutions of higher education and research institutions (December 22, 2017). Available at: https://www.rvc.ru/nti/centers/status1/protocol_22122017.pdf
16. A Report by the Subcommittee on Advanced Manufacturing Committee on Technology of the National Science & Technology Council Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing. — 2018. — 40 p.
17. Industrie 4.0 Working Group Germany Market Report and Outlook. Germany Trade and Invest. — 2018. — 16 p.
18. Made in China 2025. Institute for Security & Development Policy Report. — 2018. — 9 p.
19. White Paper: Technology and Innovation for the Future of Production: Accelerating Value Creation. World Economic Forum. — 2017. — 38 p.
20. Queensland Advanced Manufacturing 10-Year Roadmap and Action Plan. State of Queensland, Department of State Development, Manufacturing, Infrastructure and Planning. — 2018. — 44 p.
21. Exponential technologies in manufacturing. Deloitte Development LLC. — 2018. — 64 p.
22. Advanced Technologies Initiative Manufacturing & Innovation. Deloitte Touche Tohmatsu Limited. — 2015. — 84 p.
23. Salatin C., Solomon C., Baranda J. S., Chanal H. Analysis on current and future capabilities requirements of Key Enabling Technologies (KETs) in Advanced Manufacturing. — 2014. — 19 p.
24. Sheppard B., Shaw C., Williams B. et al. Factory of the Future. Issue One. McKinsey & Company. — 2014. — 32 p.
25. Roadmap for cross-cutting KETs activities in Horizon 2020. European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. — 24 p.
26. The Methodology for evaluating technology readiness for the projects of the Federal Targeted Program for Research and Development in Priority Areas of Development of the Russian Scientific and Technological Complex for 2014–2020 approved by the Deputy Minister of Education and Science of the Russian Federation. Available at: http://fcpir.ru/upload/medialibrary/955/gt_57_14vn_metodika-ugt-_002_.pdf
27. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Digital twins: definition, approaches and methods of development]. Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiem, 20–22 iyunya 2019 [Digital Transformation of economy and industry: collection of works of the scientific-practical conference with foreign participation, June 20–22, 2019]. Ed. by A. Babkin. SPb: Polytech-Press, 2019, 780 p.