

<https://doi.org/10.17073/2072-1633-2026-1-1492>

Стратегические подходы к цифровой трансформации материально-технического обеспечения энергетических компаний на основе внедрения аддитивных технологий

А.В. Самойленко¹✉, М.В. Афанасьев¹ , А.М. Фадеев^{1,2} 

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Российская Федерация

² Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», 184209, Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, д. 24а, Российская Федерация

✉ samoilenko.av@edu.spbstu.ru

Аннотация. В статье исследована роль аддитивного производства как инструмента цифровой трансформации системы материально-технического обеспечения энергетических и нефтегазовых компаний в условиях перехода к «зеленой» экономике. Цель работы заключается в обосновании возможностей интеграции аддитивных технологий в промышленное снабжение для снижения логистических, временных и экологических издержек. В настоящем исследовании основное внимание уделено нефтегазовым компаниям как наиболее показательному сегменту энергетического комплекса, для которого вопросы устойчивости материально-технического обеспечения, удаленности производственных объектов, высокой стоимости логистики и риска простоев оборудования имеют особую значимость. Методическую основу исследования составили: анализ научной литературы, системно-структурный, абстрактно-логический и экономико-статистический методы, а также изучение отраслевых кейсов внедрения. Установлено, что использование аддитивного производства в системе материально-технического обеспечения позволяет локализовать изготовление части материально-технических ресурсов, сократить зависимость от внешних поставщиков и повысить устойчивость цепочек снабжения. На примере российских нефтегазовых компаний показано, что внедрение аддитивных технологий сопровождалось снижением доли импорта отдельных комплектующих на 15–20 %, а в ряде проектов – до 30 %. Кроме того, размещение 3D-печати вблизи объектов эксплуатации позволяет более чем в 10 раз сократить временные издержки, связанные с обеспечением потребности в отдельных деталях и комплектующих, а также снизить логистические затраты, объемы отходов и риски простоя оборудования. Сделан вывод, что аддитивное производство является значимым направлением цифровой трансформации материально-технического обеспечения, создающего одновременно экономический и экологический эффект.

Ключевые слова: аддитивное производство, материально-техническое обеспечение, «зеленая» экономика, цифровые технологии, цифровая трансформация

Для цитирования: Самойленко А.В., Афанасьев М.В., Фадеев А.М. Стратегические подходы к цифровой трансформации материально-технического обеспечения энергетических компаний на основе внедрения аддитивных технологий. *Экономика промышленности*. 2026;19(1):70–83. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2026-1-1492>

Strategic approaches to the digital transformation of logistics for energy companies based on the introduction of additive technologies

A.V. Samoylenko¹✉, M.V. Afanasiev¹ , A.M. Fadeev^{1,2} 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29B Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

² Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre,
Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
24a Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region 184209, Russian Federation

✉ samojlenko.av@edu.spbstu.ru

Abstract. The article examines the role of additive manufacturing as a tool for the digital transformation of the material and technical support system of energy and oil-and-gas companies in the context of the transition to a green economy. The purpose of the study is to substantiate the possibilities of integrating additive technologies into industrial supply systems in order to reduce logistics, time, and environmental costs. In this study, primary attention is given to oil and gas companies as the most representative segment of the energy sector, for which the resilience of material and technical support, the remoteness of production facilities, high logistics costs, and the risk of equipment downtime are of particular significance. The methodological framework of the study includes an analysis of academic literature, as well as systemic-structural, abstract-logical, and economic-statistical methods, together with an examination of industry implementation cases. It has been established that the use of additive manufacturing in the material and technical support system makes it possible to localize the production of certain material and technical resources, reduce dependence on external suppliers, and improve the resilience of supply chains. Using the example of Russian oil-and-gas companies, it is shown that the introduction of additive technologies was accompanied by a reduction in the import share of certain components by 15–20%, and in a number of projects by up to 30%. In addition, the placement of 3D printing facilities near operational sites makes it possible to reduce by more than ten times the time costs associated with meeting demand for certain parts and components, while also lowering logistics costs, reducing waste, and minimizing the risk of equipment downtime. It is concluded that additive manufacturing is an important area of digital transformation in material and technical support, providing both economic and environmental benefits.

Keywords: additive manufacturing, logistics, green economy, digital technologies, digital transformation

For citation: Samoylenko A.V., Afanasiev M.V., Fadeev A.M. Strategic approaches to the digital transformation of logistics for energy companies based on the introduction of additive technologies. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2026;19(1):70–83. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2026-1-1492>

基于增材制造技术应用的能源公司物资技术保障数字化转型的战略方法

A.V. 萨莫伊连科¹✉, M.V. 阿法纳西耶夫¹ , A.M. 法捷耶夫^{1,2} 

¹ 圣彼得堡彼得大帝理工大学, 195251, 俄罗斯联邦圣彼得堡市综合技术大街29号

² 俄罗斯科学院科拉研究中心卢津经济问题研究所,
184209, 俄罗斯联邦摩尔曼斯克州阿帕季特市费尔斯曼街街24a号

✉ samojlenko.av@edu.spbstu.ru

摘要: 本文探讨了增材制造技术在能源和油气公司向绿色经济转型背景下, 如何作为一种工具, 助力其物流系统实现数字化转型。研究旨在论证将增材制造技术融入工业供应链, 从而降低物流成本、时间成本和环境成本的潜力。本研究聚焦于油气公司, 因为它是能源综合体中最具代表性的组成部分, 物流可持续性、生产设施的偏远性、高昂的物流成本以及设备停机风险等问题对它们而言尤为重要。本研究的方法论基础包括文献分析、系统结构分析、抽象逻辑分析和经济统计分析, 以及对行业实施案例的研究。研究表明, 在物流系统中应用增材制造技

технологии способны реализовать часть материалов и технологий локально, что снижает зависимость от внешних поставщиков, повышает устойчивость цепочек поставок и снижает риски сбоев. Например, в автомобильной промышленности внедрение 3D-печати позволяет сократить время на производство деталей до 50%, что критически важно для быстрого реагирования на изменения спроса и условий производства [1].

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, цифровая трансформация, устойчивость, цепочки поставок, локализация производства.

Введение

Сегодня энергетический сектор сталкивается с беспрецедентными вызовами в связи с необходимостью декарбонизации, повышения энергоэффективности и перехода к моделям экономики замкнутого цикла. Статистика Международного энергетического агентства (IEA) демонстрирует, что на производство и логистику в цепочках поставок приходится до 25 % глобальных выбросов углекислого газа, что противоречит целям Парижского соглашения и концепции устойчивого развития в рамках развития «зеленой» экономики¹. Использование традиционных субтрактивных методов изготовления компонентов из возобновляемых источников энергии часто сопровождается значительными потерями материалов (до 90 %), высокими транспортными расходами и зависимостью от мировых поставщиков [1; 2]. Эти факторы замедляют реализацию проектов в области «зеленой» экономики, особенно в отдаленных регионах, где локализация производства критически важна с точки зрения экономии финансовых и временных затрат.

Структурные преобразования системы материально-технического обеспечения и закупочной деятельности носят стратегический характер, поскольку затрагивают устойчивость цепочек поставок, уровень зависимости от внешних поставщиков, сроки обеспечения производственных процессов и риски простоя оборудования. В логике стратегирования пересмотр действующей системы обеспечения должен основываться на мониторинге и прогнозировании факторов внешней и внутренней среды [3]. Для рассматриваемого объекта ключевыми являются тренды декарбонизации и перехода к «зеленой» экономике, цифровой трансформации промышленного снабжения, санкционных ограничений, а также формирования технологического суверенитета и локализации производства [4].

Действующие санкционные ограничения по отношению к Российской Федерации повлияли на импорт важных материально-технических

ресурсов. Внешнее давление является одним из факторов активизации процессов формирования технологического суверенитета, характеризующегося стратегическими преобразованиями в области системы промышленного снабжения [4].

Зависимость от внешних факторов и стремительные изменения геополитической ситуации непосредственно влияют на эффективность системы промышленного снабжения. Поэтому на стратегическом уровне необходимо заблаговременно разработать комплекс мер, направленных на минимизацию рисков и угроз, способных оказать негативное воздействие на систему материально-технического обеспечения [5].

В условиях санкционных ограничений, логистических разрывов и высокой зависимости от внешних поставщиков особую значимость приобретает поиск инструментов, способных повысить устойчивость системы материально-технического обеспечения. Одним из таких инструментов выступают технологии аддитивного производства, позволяющие перейти от централизованных цепочек поставок к распределенной модели – «печати по требованию». Такой подход обеспечивает локализацию изготовления части комплектующих, сокращение сроков обеспечения потребности в запасных частях и снижение рисков, связанных с перебоями поставок. В сочетании с другими цифровыми технологиями Индустрии 4.0 аддитивное производство способствует не только оптимизации логистических процессов, но и снижению углеродного «следа» за счет уменьшения отходов, материалоемкости и повышения энергоэффективности компонентов [6].

Задачей, требующей решения в настоящей работе, является обоснование роли аддитивного производства как катализатора цифровой трансформации системы материально-технического обеспечения. С этой целью проанализированы механизмы интеграции аддитивного производства в цифровые экосистемы промышленного снабжения, рассмотрены успешные кейсы внедрения, выделив экологические, экономические и операционные преимущества, а также выявлены барьеры и риски внедрения в части стратегии масштабирования.

¹ International Energy Agency. Data and statistics. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics> (accessed on 29.03.2025).

Исходным материалом для исследования послужила научная литература по теме исследования, статистические данные о финансово-хозяйственной деятельности предприятий различных отраслей и открытые источники в сети Интернет.

Для исследования применены следующие методы: абстрактно-логический, системно-структурный, экономико-статистический.

Результаты и обсуждение

Аддитивные производственные технологии представляют собой группу технологий, используемых для построения физических моделей, прототипов, инструментальной оснастки и функциональных деталей на основе трехмерных компьютерных CAD- (Computer-Aided Design) моделей либо данных, получаемых с помощью 3D-сканирования. Технологии аддитивного производства во многих практических областях имеют ряд преимуществ перед традиционными методами производства [6].

Одним из таких преимуществ является создание объекта «с нуля» с помощью постепенного добавления материала. За счет этого обеспечивается возможность одновременного решения задач формообразования и контроля состава материала в рамках производственного процесса. При меньшем объеме используемого материала достигается наибольшая точность формы и степени контроля состава материалов. Теоретически может быть получена любая трехмерная форма без использования внешних инструментальных средств с заданной формой [6].

По сравнению с традиционными производственными технологиями аддитивное производство также обладает рядом преимуществ, значимых для трансформации системы материально-технического обеспечения предприятий в условиях перехода к «зеленой» экономике и реализации принципов устойчивого развития. На рис. 1 представлена схема сравнения производственных технологий.

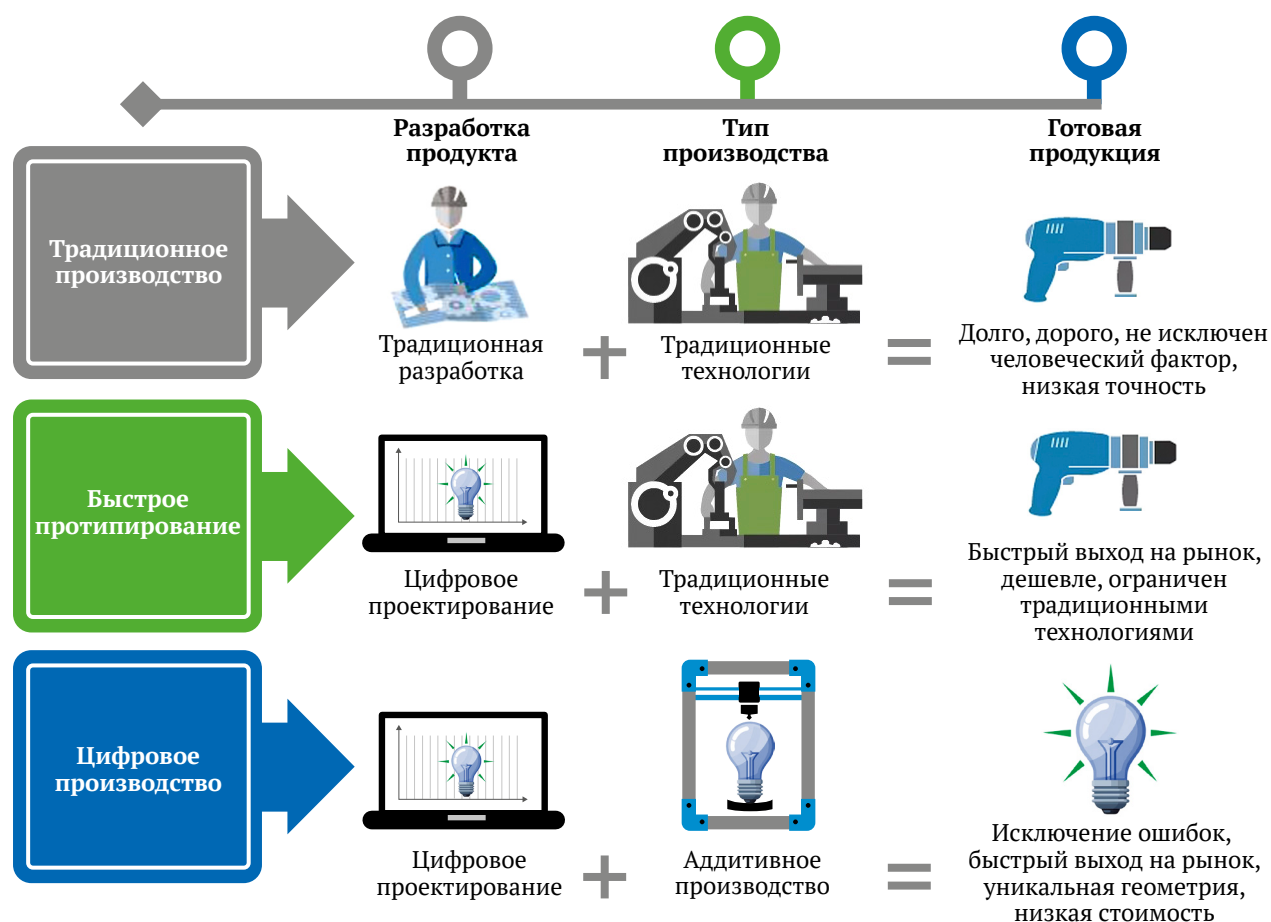


Рис. 1. Сравнительная схема аддитивного производства и традиционных производственных технологий

Источник: составлено автором на основе [2; 6]

Fig. 1. Comparative diagram of additive manufacturing and traditional manufacturing methods

Source: compiled by the author based on [2; 6]

За счет меньшего числа технологических операций, а также низких капитальных затрат технологии аддитивного производства представляют собой перспективное направление цифровой трансформации системы материально-технического обеспечения, особенно на стадии утилизации в рамках перехода к «зеленой» экономике и соблюдению принципов устойчивого развития [7].

Преимуществами аддитивного производства являются:

- нулевые выбросы углекислого газа: в краткосрочной перспективе аддитивное производство будет обладать потенциалом в плане снижения выбросов углекислого газа и производственных отходов [2; 6];

- сырье, предназначенное для 3D-печати, может быть повторно использовано, что обеспечивает безотходное производство с рециклингом порошковых материалов и газов;

- за счет меньшего числа технологических операций по сравнению с традиционной промышленностью аддитивное производство является более энергоэффективным. На производственные процессы приходится 15 % потребления энергии на планете и до 40 % мирового потребления материалов, поэтому повышение энергоэффективности и материалоемкости производственных процессов является одним из ключевых факторов устойчивого развития компаний в частности и перехода к концепции «зеленой» экономики в целом;

- за счет возможности оперативного изготовления широкой номенклатуры не крупногабаритных запасных частей и деталей технологического оборудования аддитивное производство способствует повышению операционной эффективности ремонтных работ [8]. Кроме того, оно позволяет снижать потребление энергии и повышать энергоэффективность производственных операций [9; 10].

Система материально-технического обеспечения в нефтегазовой отрасли характеризуется высокой зависимостью от сложных цепочек поставок, длительными сроками доставки запасных частей и высокой стоимостью хранения и логистики оборудования. Дополнительные ограничения создают удаленность объектов добычи, необходимость оперативного обслуживания техники и возрастающие требования к устойчивости и снижению ресурсной нагрузки. В этих условиях поиск технологических решений, способных повысить гибкость и эффективность снабжения, становится актуальной задачей. Внедрение аддитивного производства в нефтегазовой отрасли позволяет занять особое место в материаль-

но-техническом обеспечении в рамках тренда цифровой трансформации [7].

Крупнейшие нефтегазовые компании сталкиваются с трудностями в системе материально-технического обеспечения. В первую очередь, это связано с удаленностью нефтегазовых месторождений от крупных промышленных центров, что увеличивает логистические издержки и сроки поставок [11; 12]. Выход из строя оборудования на месторождении способен приносить существенные финансовые убытки, в связи с чем периодичность и стабильность поставок являются важным фактором эффективности системы промышленного снабжения [13]. Во многих случаях на территории месторождений отсутствуют крупные склады с необходимыми запасами запчастей и расходных материалов, поэтому в аварийных ситуациях поставки должны быть организованы в короткий срок с минимизацией логистических и временных затрат [12; 13].

Закупка запасных частей и расходных материалов в российских нефтегазовых компаниях осуществляется в рамках регламентированных конкурентных процедур. Анализ практики электронных торговых площадок показывает, что проведение закупочной процедуры и подготовка необходимой документации в совокупности могут занимать около 3,5 месяцев. Такой срок является критичным при необходимости срочного обслуживания оборудования или его аварийного отключения. Именно поэтому для части номенклатуры материально-технических ресурсов особую значимость приобретает внедрение аддитивного производства, позволяющего перейти от ожидания внешней поставки к оперативному изготовлению необходимых изделий на территории производственного объекта.

В условиях санкционных ограничений, когда перестали работать логистические цепочки поставок материально-технических ресурсов и международные торговые отношения между Россией и странами так называемого коллективного Запада, внедрение аддитивного производства является рациональной и обоснованной мерой в целях локализации производства на территории России² [8]. За прошедший период в рамках политики формирования технологического суверенитета отмечается снижение доли импорта, сроков поставки, финансовых затрат на логистику и за-

² Фадеев А.М., Цветкова А.Ю. Стратегические подходы к обеспечению технологического суверенитета в энергетической отрасли России. В сб.: Менеджмент, экономика, этика, технология МЕЕТ 2023. Тезисы докл. IX Междунар. конф. Санкт-Петербург, 06–07 октября 2023 г. СПб.: СПбГУ Екатерины II; 2024. С. 55–60.

купку. Политика легализации параллельного импорта привела к повышению стоимости материально-технических ресурсов за счет удорожания логистики их доставки через дружественные к РФ страны [9]. На данную продукцию, которую привозят в страну через юридических посредников, не распространяется гарантия и постгарантийное обслуживание, за счет чего формируются дополнительные риски и угрозы [10; 11].

С учетом вышесказанного, в настоящем исследовании в качестве основной отрасли применения аддитивных технологий рассматриваются нефтегазовые компании. Такой выбор обусловлен высокой удаленностью месторождений от промышленных центров, значимостью бесперебойного материально-технического обеспечения и высокой чувствительностью производственных процессов к задержкам поставок. В этих условиях аддитивное производство может занять важное место в системе материально-технического обеспечения в рамках цифровой трансформации компаний. Размещение 3D-печати на территории производственных объектов позволяет сократить логистические издержки, поскольку необходимые изделия изготавливаются непосредственно на месте эксплуатации, а временные издержки, связанные с поиском и выбором контрагента, могут быть сокращены более чем в 10 раз [12; 13]. Кроме того, для нефтегазовых компаний внедрение аддитивных технологий отвечает задачам устойчивого развития, поскольку способствует снижению отходов, повышению энергоэффективности и уменьшению углеродного следа.

Рассмотрение успешных кейсов внедрения аддитивного производства

Перейдем к рассмотрению успешных кейсов внедрения аддитивного производства.

ПАО «Газпром» начало строительство специализированного литейного комплекса для турбинных лопаток в России. На территории комплекса планируется возведение участка 3D-печати керамических стержней и моделей, лопаток из металлического порошка по технологии селективного лазерного плавления. Следует отметить, что номенклатура закупалась у зарубежных компаний Siemens и General Electric. После ввода в эксплуатацию производственного участка с применением аддитивных технологий прогнозируется сокращение доли импорта на 30 %³.

³ ГЭХ начал строительство литейного комплекса по производству лопаток газовых турбин. Neftegaz.ru. 10.10.2023. Режим доступа: <https://neftgaz.ru/news/Oborudovanie/797431-gekh-nachal-stroitelstvo-liteynogo-kompleksa-po-proizvodstvu-lopatok-gazovykh-turbin/> (дата обращения: 29.03.2025).

Следующим примером является компания ПАО «НК «Роснефть», которая за счет внедрения аддитивных технологий на месторождениях Западной Сибири снизило долю импорта износоустойчивых клапанов и втулок для бурового оборудования на 15–20 % (ранее 90 % продукции закупалось у компаний из ФРГ и США)⁴.

Еще одним примером является внедрение аддитивных технологий компанией ООО «Газпромнефть-Оренбург». С помощью 3D-принтеров была изготовлена номенклатура различных деталей и запасных частей для компрессорных станций Капитоновского и Оренбургского углеводородных месторождений. В результате проведенных процедур тестирования установлено, что напечатанные образцы изделий по своим эксплуатационным и физико-механическим свойствам, а также показателям прочности и надежности, полностью соответствуют оригинальным компонентам, которые закупались у внешних контрагентов. Изготовленная партия материально-технических ресурсов прошла процедуру сертификации и соответствующую экспертизу, по итогам которой было подтверждено высокое качество и соответствие отраслевым стандартам в области аддитивного производства и изготовленных промышленных изделий. Проект был реализован совместно с дочерней компанией «Газпром нефти», а именно ООО «Газпромнефть-Цифровые решения». Специалистами компании выполнен полный цикл работ, начиная от лазерного сканирования, т.е. технологии обратного реверсивного инжиниринга, и заканчивая созданием цифровой CAD-модели с определением выбора типа сырья для 3D-принтера⁵.

Таким образом, деятельность крупных компаний подтвердила тот факт, что применение аддитивных технологий перспективно в плане снижения финансовых издержек, уменьшения времени простоя оборудования во время ремонта и повышения операционной эффективности. Указанные компании планируют активно внедрять полученный опыт в первую очередь на удаленных от крупных промышленных центров месторождениях, расположенных на территории с недостаточно развитой транспортно-логисти-

⁴ «Роснефть» открыла в Уфе лабораторию технологий 3D-печати. Роснефть. 13.09.2024. Режим доступа: <https://www.rosneft.ru/press/subsidiaries/item/220781/> (дата обращения: 29.03.2025).

⁵ В Оренбуржье начали печатать детали для месторождений на 3D-принтере. Rambler. Финансы. 28.03.2023. Режим доступа: <https://finance.rambler.ru/business/50454568-v-orenburzhe-nachali-pechatat-detali-dlya-mestorozhdeniya-na-3d-printere/> (дата обращения: 29.03.2025).

ческой инфраструктуры. К таким территориям относятся Арктическая зона Российской Федерации, Крайний Север и часть Западной и Восточной Сибири.

Помимо нефтегазовой отрасли, внедрение технологий аддитивного производства нашло свое применение в иных крупных по объему деятельности секторах экономики различных стран мира. Крупнейшая мировая германская компания Siemens Energy AG по производству оборудования для энергетической отрасли активно внедряет цифровые технологии аддитивного производства – компания поддерживает тренд энергетического перехода, стремясь ограничить рост средней температуры на Земле и снизить глобальные выбросы углекислого газа. Позиционируя себя как крупная компания, занимающаяся внедрением энергетических технологий, Siemens Energy AG стремится к формированию пути перехода к устойчивой энергетической системе с помощью внедрения новых цифровых технологий и стратегий в рамках инновационного сотрудничества с предприятиями энергетической отрасли по всему миру.

Уже более 107 государств, на долю которых приходится около 82 % выделяемых парниковых газов, приняли на себя обязательства по достижению нулевых выбросов углекислого газа, закрепив эти обязательства в национальных законодательствах⁶. Стремление к декарбонизации является точкой соприкосновения интересов как государственной власти стран, так и интересов бизнеса.

Siemens Energy AG активно развивает направление аддитивного производства. Одним из примеров является испытание газотурбинного генератора SGT-A05, выполненного на основе авиационного двигателя с напечатанным на 3D-принтере смесителе топлива и воздуха. Обычно эта деталь состоит из 20 компонентов, так как геометрически сложна в исполнении, что исключает возможность литья цельной единицы изделия. Благодаря 3D-печати было сокращено число компонентов до 2 единиц, а также снижены временные издержки на 70 %⁷. За счет применения 3D-печати сложных компонентов газотурбинных генераторов, упрощены логистические цепочки и производственные процессы, повысилась эффективность производства благодаря оп-

тимизации геометрической формы напечатанных изделий [14].

Аддитивное производство находит свое применение и в сфере возобновляемых источников энергии. Весной 2022 г. в открытых источниках была опубликована информация о том, что французская компания GE Renewable Energy находится на завершающей стадии производства крупнейшего 3D-принтера для печати бетонных оснований морских ветрогенераторов⁸. Данный проект не имеет аналогов в мире – планируется ввод в эксплуатацию 3D-принтера высотой чуть более 20 м, который сможет печатать бетонные основания для морских ветрогенераторов высотой до 20 м. Помимо внушительных размеров и необычного для данной отрасли целевого назначения, собирающийся 3D-принтер будет являться одним из самых быстрых на рынке цифровых технологий аддитивного производства – он сможет действовать в 3D-печати до 10 т бетона/ч. Традиционно башни ветряных турбин, построенные из сборного железобетона или стали, поставляются высотой около 100 м, так как ширина основания не должна в диаметре превышать 4,5 м, иначе транспортировка по дорожной инфраструктуре будет сопровождена более высокими логистическими издержками. За счет печати бетонного основания 3D-принтером рядом со строительными объектами высота башни может быть увеличена до 150–200 м, что в свою очередь упростит создание ветрогенераторов, обладающих более высокими показателями энергоэффективности⁹.

Таким образом, рассмотрев примеры внедрения цифровых технологий аддитивного производства, можно выделить их основные преимущества и роль в вопросе цифровой трансформации системы материально-технического обеспечения предприятий. К ним относятся:

- снижение логистических издержек;
- уменьшение времени простоя оборудования во время ремонта или обслуживания [15];
- сокращение времени производства;
- снижение потребления энергии и повышение энергоэффективности технологических операций по производству необходимых материально-технических ресурсов;

⁶ Net Zero Coalition. United Nations. Available at: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition> (accessed on 29.03.2025).

⁷ Additive manufacturing for gas turbines. Siemens Energy. Available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offering/power-generation/additive-manufacturing.html> (accessed on 29.03.2025).

⁸ Fit to Print: GE Is Looking at 3D-Printing Wind Turbine Towers from Concrete. GE Reports. 25.04.2022. Available at: <https://www.ge.com/news/reports/fit-to-print-ge-is-looking-at-3d-printing-wind-turbine-towers-from-concrete-for-more> (accessed on 29.03.2025).

⁹ GE Renewable Energy, COBOD and Holcim develop record breaking 3D concrete printed wind turbine towers. Holcim. Available at: <https://www.holcim.com/media/media-releases/lafargeholcim-record-wind-turbine-towers-3d-printed-concrete> (accessed on 29.03.2025).

- снижение или минимизация объемов промышленных отходов;
- рециклинг исходного сырья для печати изделий на 3D-принтерах;
- декарбонизация сфер экономики, выражаемая в снижении объемов выделения углекислого газа в атмосферу Земли;
- снижение финансовых издержек на получение требующихся материально-технических ресурсов;
- оптимизация закупочной деятельности;
- развитие предприятий за счет цифровой трансформации;
- привлечение дополнительных инвестиций с потенциальным ростом стоимости рыночной капитализации предприятий;
- создание новых рабочих мест с привлечением специалистов в области 3D-проектирования;
- формирование технологического суверенитета в рамках политики импортозамещения [16];
- развитие «зеленой» экономики и концепции ответственного потребления;
- создание изделий со сложной геометрией;
- гибкая конверсия производственных цепочек;
- малосерийное производство, которое экономически выгодно при производстве небольших партий материально-технических ресурсов;
- учет локализованных нужд, т.е. 3D-печать деталей, адаптированных под специфические условия эксплуатации (экстремальные температуры, высокая влажность и пр.);
- кастомизация в реальном времени за счет применения технологий аддитивного производства в совокупности с прочими цифровыми технологиями Индустрии 4.0;
- локализация производства, которая позволяет снизить риски в цепочках поставок (актуально для российских компаний, столкнувшихся с санкционным давлением и логистическими кризисами в связи с массовым уходом зарубежных компаний в 2022 г.) [17];
- оптимизация складской логистики, выражаемая в снижении объемов хранения запасных частей и расходных материалов;
- ускорение научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности за счет быстрого прототипирования и внедрения итеративного подхода, т.е. возможности вносить изменения в дизайн на основе обратной связи, сокращая время выхода на рынок;
- использование альтернативных материалов, таких как биоразлагаемые полимеры, для создания временных поддерживающих конструкций и переработанные металлические порошки;

- доступность внедрения цифровых технологий аддитивного производства за счет снижающейся стоимости настольных 3D-принтеров для субъектов среднего и малого предпринимательства.

Несмотря на значительные преимущества внедрения цифровых технологий аддитивного производства в систему материально-технического обеспечения в рамках цифровой трансформации и перехода к модели «зеленой» экономики, существуют значительные вызовы, барьеры и риски, которые следует рассмотреть более детально.

Прежде всего, внедрение аддитивного производства затрудняется существующими технологическими ограничениями:

1. Ограниченный выбор материалов – в отличие от традиционных методов производства 3D-печать в настоящее время поддерживает лишь ограниченный перечень сырья. Это сужает область применения технологии, особенно в отраслях, требующих специфических свойств (например, жаропрочные сплавы для турбин или биосовместимые материалы для медицины). Однако ситуация меняется – исследования в области материаловедения, такие как разработка графеновых композитов или перерабатываемых полимеров, расширяют возможности и сферы применения цифровых технологий аддитивного производства. К 2030 г. прогнозируется увеличение доли материалов, адаптированных под использование для 3D-печати, на 40 %, благодаря чему внедрение аддитивного производства найдет более широкое применение в аэрокосмической отрасли, энергетическом секторе и циркулярной экономике [1; 18].

2. Аддитивные технологии могут сталкиваться с трудностями при воспроизведении элементов с экстремальной детализацией, такими как консольные конструкции, полости с минимальным сечением или тонкостенные объекты. Например, при печати металлом или высоковязкими полимерами отсутствие опорных структур может привести к деформации слоев, а в случае длинных выступов – к их обрушению из-за гравитации. Такие дефекты критичны для аэрокосмических компонентов или медицинских имплантов, где точность и прочность играют ключевую роль. В настоящее время прогресс в области алгоритмов генеративной поддержки и многоосевой печати позволяет минимизировать описанные риски. С помощью гибридных систем и технологий проектирования для аддитивного производства, которые сочетают в себе процесс 3D-печати с роботизированной постобработкой, создаются бионические структуры для теплообменников и ветротурбин. Прогнозируется увеличение доли напечатанных деталей со

сложной геометрической формой на 30 %, демонстрируя потенциал преодоления текущих ограничивающих факторов [19].

3. Недостаточная прочность и износостойкость материалов, используемых для реализации аддитивного производства. Например, полимеры типа PLA или ABS, распространенные в FDM- (Fused Deposition Modeling) технологиях, демонстрируют более низкую усталостную прочность и устойчивость к динамическим нагрузкам по сравнению с литыми металлами или композитами, применяемыми в традиционном производстве. Это сужает область использования цифровых технологий аддитивного производства в различных высоконагруженных отраслях: аэрокосмической (лопатки турбин), автомобилестроении (шасси, подвески) или тяжелом машиностроении (пресс-формы). Для нивелирования данных ограничений внедряются металлические порошки с наноструктурированными добавками (например, карбид кремния), которые повышают прочность материалов на 25–30 % в среднем. Прогнозируется к 2027 г. увеличение объема рынка высокопрочных материалов для организации аддитивного производства на 40 %, что позволит производить критические компоненты для водородной энергетики и робототехники методами аддитивного производства [1; 2; 6; 20].

4. Существенным барьером для внедрения технологий аддитивного производства остается высокая стоимость промышленного оборудования [21]. Например, промышленные системы для печати металлом, такие как EOS M 400 или SLM Solutions NXG XII 600, требуют инвестиций от 500 тыс. до 2 млн долл. США, что делает их недоступными для субъектов малого и среднего предпринимательства. Также, эксплуатация указанного оборудования требует квалифицированных операторов и специалистов, способных работать с CAD/CAM-системами и решать проблемы и вопросы, связанные с калибровкой или конечной постобработкой напечатанных деталей. Существуют более дешевые аналоги, средняя стоимость которых составляет от 3 до 10 тыс. долл. США, но данные 3D-принтеры ограничены в используемом типе сырья (в основном это полимеры) и размерах напечатанных деталей (до 30 см), что значительно сужает возможности их потенциального применения в производстве крупносерийных деталей. Несмотря на высокую стоимость, по статистическим данным профильных агентств (Wohlers Associates, ASTM International, Gartner, IDC и MarketsandMarkets), стоимость производственных систем для организации аддитивного производства снижается

на 20–25 % благодаря возросшему объему производства компонентов и росту конкуренции между крупными игроками-производителями на рынке предложения 3D-принтеров и программного обеспечения к ним¹⁰.

Таким образом, несмотря на вышеописанные ограничения и технические сложности, цифровые технологии аддитивного производства становятся все более и более демократичным инструментом, адаптируясь к запросам различных отраслей экономики – от медицины до «зеленой» энергетики. Возрастающий спрос на технологии 3D-печати и реверсивного инжиниринга демонстрирует приверженность бизнеса и общества не только к локализации производства, минимизации финансовых издержек на логистику, производство, таможенных платежей и закупку материально-технических ресурсов, но и к формированию безотходного производства с соблюдением концепции рециклинга исходного сырья, снижению углеродного «следа» в рамках стратегии декарбонизации и энергетического перехода с дальнейшим формированием «зеленой» энергетики и экономики рационального потребления ископаемых ресурсов с минимальным негативным воздействием на окружающую среду.

Следующей группой барьеров применения аддитивного производства являются вопросы и проблемы, связанные непосредственно с организацией производства внутри компании (табл. 1).

Таким образом, можно отметить, что преодоление организационных барьеров является более сложным процессом по сравнению с технологическими ограничениями, но благодаря комплексному подходу эти ограничения не являются преградой для внедрения технологий аддитивного производства в систему материально-технического обеспечения. Компания Bosch Rexroth, перестроив процедуры закупок и логистики, а также обучив более 500 сотрудников по работе с 3D-технологиями, успешно внедрила аддитивное производство, сократив срок поставки расходных материалов и запчастей на 70 %, а также снизив затраты на складирование¹¹.

¹⁰ Wohlers Report 2026: Global additive manufacturing revenues reach \$24.2 billion. TCT Magazine. 17.02.2026. Available at: <https://www.tctmagazine.com/wohlers-report-2026-additive-manufacturing-revenues-reach-24-2-billion/> (accessed on 29.03.2025).

¹¹ Bosch Rexroth enables series production using 3D printing. 3Druck.com. 01.04.2019. Available at: <https://3druck.com/en/industry-2/bosch-rexroth-series-production-using-3d-printing-2880958/> (accessed on 29.03.2025).

Таблица 1 / Table 1

Организационные риски и барьеры при внедрении аддитивного производства

Organizational risks and barriers in the implementation of additive manufacturing

Организационный риск	Сущность	Пример	Решение
Недоверие руководства и сотрудников компании	Скептическое отношение топ-менеджеров, акционеров и рядового персонала к внедрению аддитивного производства	Отказ от цифровых 3D-моделей в пользу физических изделий	Организация ограниченных по объему пилотных проектов для демонстрации эффективности внедрения аддитивного производства на конкретном примере
Дефицит квалифицированных кадров	Нехватка высококвалифицированных специалистов в области работы с CAD/CAM-системами, постобработкой изделий, генеративным дизайном и управлением цифровыми цепочками производства		Создание корпоративных учебных программ совместно с ведущими техническими высшими образовательными учреждениями
Необходимость реструктуризации устоявшихся деловых обычаев и бизнес-процессов	Нарушения синхронизации в работе между отделами и структурами компании		Внедрение гибкой методологии процессов управления и переход к использованию расширенными ERP-системами с дополнительными модулями управления, отвечающими за аддитивное производство
Отсутствие взаимодействия между департаментами и отделами предприятий	Разобщенность между отделами, отвечающими за НИОКР, производство и логистику может потенциально затруднить процессы координации	Конфликт инженеров, предлагающих сложные 3D-модели, и менеджеров экономических и логистических отделов, требующих упрощения конструкции для снижения финансовых и временных затрат	Создание кросс-функциональных рабочих групп для управления процессами внедрения цифровых платформ, отвечающих за коллаборацию
Управление интеллектуальной собственностью	Цифровые CAD/CAM-модели проектируемых деталей уязвимы для утечек и ситуаций несанкционированного использования третьими лицами	Юридические споры между компаниями-партнерами по цепочке поставок за права на использование 3D-моделей	Внедрение технологии блокчейн для защиты авторских прав и разработка внутренних нормативных регламентов по работе с цифровыми активами
Корпоративная культура и внутренняя коммуникация	Иерархическая структура особенно крупных компаний и бюрократические барьеры замедляют оперативное принятие управленческих решений	Долгое и многоуровневое согласование закупочной процедуры для поставки 3D-принтеров	Введение поощрения культуры инноваций через внутренние корпоративные мероприятия с выделением грантов для особо активных и эффективных сотрудников и децентрализация управления

Условия принятия управленческого решения по внедрению технологий аддитивного производства схематично представлены на **рис. 2**.

Успешное внедрение аддитивного производства невозможно без поддержки со стороны государства. Существует множество российских стандартов, регламентирующих различные аспекты аддитивного производства. В целях решения производственных задач в структуре Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов было организовано специальное подразделение – Технический комитет по стандартизации «Аддитивные технологии» (ТК-182). Решение о создании ТК-182 принято национальным органом по стандартизации и утверждено Приказом Федерального Агентства по техническому регулированию и метрологии

России от 01 сентября 2015 г. № 1013. В дальнейшем приказом Росстандарта от 28 февраля 2018 г. № 383 утверждена структура, состав ТК, область деятельности, назначены сопредседатели, заместители сопредседателей и ответственный секретарь ТК¹².

За прошедший период с создания ТК-182 в рамках своей деятельности комитетом был подготовлен 31 стандарт, прошедший стадии от первой редакции проекта стандарта до окончательной, с последующим утверждением и введением в действие.

¹² ГОСТы в области аддитивных технологий. Подборка. Аддитивные технологии – справочные данные по нормативно-техническим документам. Режим доступа: <https://addtechno.ru/additivnye-gosty> (дата обращения: 11.03.2025).



Рис. 2. Условия, влияющие на эффективность внедрения аддитивного производства

Источник: составлено авторами на основе [10]

Fig. 2. Conditions affecting the effectiveness of additive manufacturing implementation

Source: compiled by the authors based on [10]

Основным документом к рассмотрению является Распоряжение Правительства РФ от 14 июля 2021 г. № 1913-р «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г.» (далее – Стратегия). Документ закладывает основу для превращения России в одного из лидеров в области аддитивного производства, усиливая технологическую независимость и конкурентоспособность промышленности¹³.

Этот документ утверждает стратегию развития аддитивных технологий в России до 2030 г. Основными целями данного распоряжения являются:

1. Формирование технологического суверенитета:

- снижение зависимости от импорта оборудования и материалов для 3D-печати;
- создание отечественных производственных цепочек по замкнутому циклу организации аддитивного производства.

2. Интеграция в промышленность технологий 3D-печати:

– внедрение аддитивного в ключевые отрасли: авиацию, медицину, энергетику, оборонно-промышленный комплекс и нефтегазовый сектор;

– развитие цифровых производств (формирование Индустрии 4.0).

3. Научно-техническое развитие:

- поддержка НИОКР: разработка новых материалов, программного обеспечения для проектирования;
- образовательные программы для подготовки кадров.

Ключевыми направлениями для достижения поставленных выше целей являются:

- стандартизация отрасли аддитивного производства (создание ГОСТов и техрегламентов для аддитивного производства);
- формирование и развитие цифровой инфраструктуры – центров компетенций и инжиниринговых кластеров;
- меры государственной поддержки и государственно-частное партнерство: субсидии, налоговые льготы для предприятий, внедряющих 3D-печать;
- повышение объемов экспорта: продвижение российских аддитивных технологий на международных рынках.

¹³ Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 № 1913-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года». Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/135700/> (дата обращения: 11.03.2025).

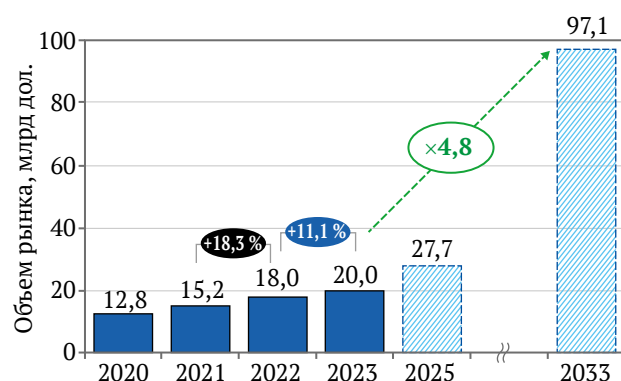


Рис. 3. Объем рынка аддитивных технологий

Источник: составлено авторами на основе [1]

Fig. 3. Market size of additive technologies

Source: compiled by the authors based on [1]

К 2030 г. при успешной реализации Стратегии ожидается:

- увеличение доли российского оборудования для организации аддитивного производства на внутреннем рынке до 60 %;

- рост объема рынка аддитивных технологий в 5–7 раз (от уровня 2021 г.);

- внедрение 3D-печати в 70 % промышленных предприятий высокотехнологичных отраслей.

Рынок аддитивного производства с каждым годом растет в объеме, что отражает заинтересованность бизнеса в вопросе внедрения цифровых технологий 3D-печати в корпоративную систему материально-технического обеспечения. На **рис. 3** представлена динамика объема рынка аддитивного производства.

Как видно из рис. 3, с 2020 г. по 2025 г. мировой рынок аддитивных технологий стабильно демонстрирует высокие темпы роста. К 2033 г. ожидается рост мирового рынка аддитивных технологий до размера в 97,1 млрд долл. США за счет массового внедрения как за рубежом, так и в Российской Федерации, технологий аддитивного производства в систему промышленного снабжения¹⁴.

¹⁴ Additive Manufacturing Market Size Report, 2030. Grand View Research. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market> (accessed on 29.03.2025).

Заключение

Технологии аддитивного производства обладают высоким потенциалом для внедрения в систему материально-технического обеспечения компаний и являются одним из ключевых инструментов цифровой трансформации промышленного снабжения. Эти технологии обеспечивают снижение углеродного «следа» компаний за счет минимизации отходов до 90 %, локализацию производства и использование перерабатываемых материалов, что согласуется с принципами циркулярной экономики. Рассмотренные кейсы компаний продемонстрировали снижение количества потребляемой энергии, повышение энергоэффективности технологических процессов производства, оптимизацию закупочной и логистической деятельности, уменьшение времени простоя оборудования во время ремонтных работ, снижение финансовых и временных издержек, а также снижение объемов выброса углекислого газа на 15–20 %.

Однако масштабирование технологий аддитивного производства напрямую связано с преодолением различных барьеров: высокой стоимости оборудования, ограниченного ассортимента материалов и дефицита квалифицированных кадров. Решение этих задач возможно через государственные субсидии развития и государственно-частное партнерство, разработку новых композитных материалов ведущими техническими высшими образовательными учреждениями и научно-исследовательскими центрами, а также внедрение программ переподготовки и повышения квалификации в области цифровых технологий аддитивного производства.

Для реализации полного потенциала внедрения аддитивного производства как ключевого инструмента цифровой трансформации материально-технического обеспечения необходимы межотраслевая коллаборация, совершенствование законодательной базы и увеличение инвестиций в НИОКР. Это позволит превратить отрасль аддитивного производства в катализатор устойчивого развития, объединяющий как экономическую эффективность, так и экологическую ответственность.

Список литературы / References

1. Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. Energy efficiency and sustainability of additive manufacturing as a mass-personalized production mode in Industry 5.0/6.0. *Energies*. 2025;18(13):3413. <https://doi.org/10.3390/en18133413>
2. Новиков С.В., Рамазанов К.Н. *Аддитивные технологии: состояние и перспективы*. Уфа: УГАТУ; 2022. 75 с.
3. Квинт В.Л. Разработка стратегии: мониторинг и прогнозирование внутренней и внешней среды. *Управленческое консультирование*. 2015;(7):6–11.
Kvint V.L. Development of strategy: scanning and forecasting of external and internal environments. *Administrative Consulting*. 2015;(7):6–11. (In Russ.)

4. Квинт В.Л., Новикова И.В., Алимуратов М.К., Сасаев Н.И. Стратегирование технологического суверенитета национальной экономики. *Управленческое консультирование*. 2022;(9):57–67. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2022-9-57-67>
Kvint V.L., Novikova I.V., Alimuradov M.K., Sasaev N.I. Strategizing the national economy during a period of burgeoning technological sovereignty. *Administrative Consulting*. 2022;(9):57–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2022-9-57-67>
5. Квинт В.Л., Хворостяная А.С., Сасаев Н.И. Авангардные технологии в процессе стратегирования. *Экономика и управление*. 2020;26(11):1170–1179. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2020-11-1170-1179>
Kvint V.L., Khvorostyanaya A.S., Sasaev N.I. Advanced technologies in strategizing. *Economics and Management*. 2020;26(11):1170–1179. (In Russ.). <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2020-11-1170-1179>
6. Каменев С.В., Романенко К.С. *Технологии аддитивного производств*. Оренбург: ОГУ; 2017. 144 с.
7. Li Z., Ruan H., Li M., Yu Ch., Jia Q., Wang J., Chen L. Additive manufacturing: Prospects and diverse applications. *Metals*. 2025;15(2):158. <https://doi.org/10.3390/met15020158>
8. Печуркин В.Е. Реинжиниринг как инструмент импортозамещения запасных частей и деталей технологического оборудования на примере Омского НПЗ. В: *Сб. трудов Всеросс. науч.-практ. и учеб.-метод. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли»*. Санкт-Петербург, 15–18 мая 2024 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2024. С. 209–216.
9. Fidan I., Naikwad V., Alkunte S., Mishra R., Tantai K. Energy efficiency in additive manufacturing: Condensed review. *Technologies*. 2024;12(2):21. <https://doi.org/10.3390/technologies12020021>
10. Jones C., Montoya M., Strawser L., Patterson A.E. Exploring time and power requirement trade-offs in an additive manufacturing-disrupted production cell. *Journal of Mechanical Design*. 2025;147(6):064501. <https://doi.org/10.1115/1.4067529>
11. Самойленко А.В. *Импортозамещение в закупочной деятельности (на примере ПАО «Газпром нефть»)*. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2023. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/3/2023/vr/vr23-3549>
12. Самойленко А.В., Кириллова Т.В. Импортозамещение в закупочной деятельности ПАО «Газпромнефть» В: *Сб. трудов науч.-практ. конф. «Интеллектуальные закупки»*. Санкт-Петербург, 26 декабря 2023 г. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2023. С. 56–61.
13. Mohammed R., Shaik A.S., Subhani M., Bunga K.K., Aggala Ch., Bairysetti P.B., Badruddin I.A. Advance-ments and challenges in additive manufacturing: future directions and implications for sustainable engineering. *Advance Sustainable Science Engineering and Technology*. 2025;7(1):1–11. <https://doi.org/10.26877/asset.v7i1.1079>
14. Кондратьев В.Б. Четвертая промышленная революция и глобализация. *Перспективы. Электронный журнал*. 2018;(2(14)):92–108. <https://doi.org/10.32726/2411-3417-2018-2-92-108>
Kondrat'ev V.B. The fourth industrial revolution and globalization. *Perspektivy. Elektronnyi zhurnal*. 2018;(2(14)):92–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.32726/2411-3417-2018-2-92-108>
15. Литвинова А.В., Логинова Е.В., Лашманкина К.Ю. Развитие концепций импортозамещения в России. *Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика*. 2024;26(4):55–67. <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2024.4.4>
Litvinova A.V., Loginova E.V., Lashmankina K.Yu. Development of import substitution concepts in Russia. *Journal of Volgograd State University. Economics*. 2024;26(4):55–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2024.4.4>
16. Самойленко А.В. Легализация параллельного импорта в Российской Федерации и ее последствия для иностранных производителей и российских потребителей. В: *Сб. трудов Всеросс. студ. науч.-учеб. конф. «Молодежная Неделя Науки Института промышленного менеджмента, экономики и торговли»*. Санкт-Петербург, 29 ноября – 03 декабря 2022 г. СПб.: «СПбПУ Петра Великого»; 2022. С. 108–110.
17. Бескровный А.В., Афанасьев М.В. Основные риски закупочной деятельности нефтегазовых предприятий в условиях санкционного давления и внешних ограничений. В: *Материалы IV Всеросс. науч.-практ. конф. «Управление закупками: современная теория и практика»*. Уфа, 22 марта 2024 г. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет; 2024. С. 15–17.
18. Siemens испытала газотурбинный генератор с 3D-печатным топливным смесителем. Сообщество владельцев 3D-принтеров. 3D Today. 13.08.2018. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/siemens-has-tested-a-gas-turbine-generator-with-3dprinted-fuel-mixer> (дата обращения: 30.03.2025).
19. Самойленко А.В. Развитие технологического партнерства в рамках организации закупочной деятельности. В: *Сб. трудов науч.-практ. конф. «Интеллектуальные закупки»*. Санкт-Петербург, 26 декабря 2023 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2023. С. 153–157.
20. Сафин Д.Ю., Мазнев Е. Аддитивные технологии в дизайне: преимущества, ограничения, способы их решения. *Научный аспект*. 2023. Режим доступа: <https://na-journal.ru/12-2023-tehnologiya-mashinostroeniya/7679-additivnye->

tekhnologii-v-dizaine-preimushchestva-ogranicheniya-i-sposoby-ih-resheniya (дата обращения: 30.03.2025).

21. Самойленко А.В. Обоснование широкого внедрения аддитивных технологий. В: *Сб. тезисов*

И Всеросс. науч. студ. конф. «Современная наука: вызовы, перспективы и возможности». Санкт-Петербург, 18 ноября 2024 г. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; 2024. С. 296–297.

Информация об авторах

Артем Вадимович Самойленко – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Российская Федерация; e-mail: samoilenko.artem2001@mail.ru

Михаил Владимирович Афанасьев – д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4098-4679>; e-mail: afanasiev_mv@spbstu.ru

Алексей Михайлович Фадеев – д-р экон. наук, профессор Высшей школы производственного менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Российская Федерация; главный научный сотрудник, Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», 184209, Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, д. 24а, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3833-3316>; e-mail: alexfadeev79@gmail.com

Information about the authors

Artem V. Samoylenko – Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation; e-mail: samoilenko.artem2001@mail.ru

Mikhail V. Afanasiev – Dr.Sci. (Econ.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4098-4679>; e-mail: afanasiev_mv@spbstu.ru

Alexey M. Fadeev – Dr.Sci. (Econ.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29B Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation; Chief Researcher, Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 24a Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region 184209, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3833-3316>; e-mail: alexfadeev79@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2025; поступила после доработки 08.03.2026; принята к публикации 11.03.2026

Received 25.09.2025; Revised 08.03.2026; Accepted 11.03.2026