

УДК 005.2:338.4

С.А. Маковецкий, Р.Н. Лепя, В.В. Трубочанин

Государственное бюджетное учреждение «Институт экономических исследований»,
Донецк, email: ups.dn@mail.ru

ПРЕИМУЩЕСТВА ИНТЕГРАЦИИ БИОНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ИНДУСТРИЮ 4.0

Ключевые слова: Индустрия 4.0, бионическая промышленность, эффективность промышленного производства, инновационные решения, бионические материалы, интеграция технологий, цифровое производство.

В статье исследуется взаимосвязь между бионической промышленностью и концепцией Индустрии 4.0, основываясь на применении передовых технологий в производственных процессах. Индустрия 4.0 представляет собой концепцию цифровой трансформации производства, включающую использование различных технологий, таких как интернет вещей, искусственный интеллект, облачные вычисления и автоматизация. С другой стороны, бионическая промышленность использует знания о биологических процессах и механизмах природы для создания инновационных материалов, систем и устройств. Статья анализирует, как бионическая промышленность может быть интегрирована в Индустрию 4.0 для создания инновационных решений и продуктов, отвечающих требованиям современных производственных процессов. Научная новизна данного исследования заключается в исследовании и описании потенциала взаимодействия между бионической промышленностью и Индустрией 4.0. Авторы статьи представляют концептуальную связь между этими областями и обсуждают возможности применения бионических технологий в рамках цифровой трансформации производства. Результаты исследования позволяют выявить новые возможности для инноваций и развития в производственной сфере, способствуя улучшению эффективности, качества и экологической устойчивости производства.

S.A. Makovetsky, R.N. Lepa, V.V. Trubchanin

State Budgetary Institution «Institute for Economic Research», Donetsk,
email: ups.dn@mail.ru

BENEFITS OF INTEGRATION OF THE BIONIC INDUSTRY INTO INDUSTRY 4.0

Keywords: Industry 4.0, bionic industry, industrial production efficiency, innovative solutions, bionic materials, technology integration, digital manufacturing.

The article explores the relationship between the bionic industry and the concept of Industry 4.0, based on the application of advanced technologies in manufacturing processes. Industry 4.0 is a concept for the digital transformation of manufacturing, including the use of various technologies such as the Internet of things, artificial intelligence, cloud computing and automation. On the other hand, the bionic industry uses knowledge of the biological processes and mechanisms of nature to create innovative materials, systems and devices. The article analyzes how the bionic industry can be integrated into Industry 4.0 to create innovative solutions and products that meet the requirements of modern manufacturing processes. The scientific novelty of this study lies in the study and description of the potential for interaction between the bionic industry and Industry 4.0. The author of the article presents a conceptual relationship between these areas and discusses the possibilities of applying bionic technologies in the framework of the digital transformation of production. The results of the study allow to identify new opportunities for innovation and development in the manufacturing sector, contributing to the improvement of efficiency, quality and environmental sustainability of production.

В течение истории цивилизации человек постоянно стремился черпать вдохновение для своего технологического развития из живой природы. В 1960-х годах появилась новая наука, называемая бионикой, которая сочетает биологию и технику для решения инженерных задач на основе изучения структуры и функционирования живых организмов. В настоящее время мы все чаще

слышим термины «природоподобные технологии» (или «life-технологии»), «зеленые технологии» и «зеленая экономика». Мировое сообщество стоит на пороге перехода к шестому технологическому укладу, где ключевыми факторами станут биотехнологии, нанотехнологии, когнитивные технологии, робототехника, материалы с заранее заданными свойствами и другие. Однако на первый

план выходят биотехнологии, поскольку они могут стать интегральной областью, объединяющей различные аспекты других отраслей науки и технологии, включая нанотехнологии, робототехнику, когнитивные технологии и многие другие. Кроме того, внедрение новых биотехнологий обещает большие коммерческие возможности, особенно в промышленном производстве. Таким образом, технологический уклад определяет определенный «коридор», в котором развитие технологий, включая биотехнологии, будет происходить наиболее быстрыми темпами. Борьба за ресурсы и рынки сбыта ставит во главу угла использование новых технологий. Одним из востребованных направлений реализации потребностей промышленности является бионика, особенно в области точного машиностроения, может ожидать нового витка развития благодаря анализу особенностей живых организмов на новом уровне технологического прогресса. Этот анализ может предложить новые направления для развития промышленного производства.

Целью исследования является изучение возможности интеграции принципов бионической промышленности и Индустрии 4.0 в контексте трансформации производства.

Материал и методы исследования

Несмотря на то, что бионика относительно молодая наука, множество ученых внесли свой вклад в ее развитие. Среди них зарубежные и отечественные ученые: Дж. Э. Стил [2], Robert Barlow, Johannes Fischer, Ж. Местраль [8], Ilmar Ferdinand Fischer [9], Ю.С. Лебедев, Н.Е. Жуковский [5].

Бионические принципы в промышленных и экономических процессах рассматривали такие ученые как: В.Л. Квинт [21, 22], А.В. Бабкин [21, 23, 25], Е. В. Шкарупета [21, 25], Воробьев А. Е., Воробьев К. А. [24], Т.Н. Шарапова [1], Глухов В. В., Гилева Т. А., Плетнев Д. А. [25]. Однако многие методологические аспекты требуют уточнения.

Бионическая промышленность – это область промышленности, основанная на применении бионических технологий, которые используют биологические процессы и механизмы в природе для создания новых продуктов и процессов [1].

Корни бионики уходят в древние времена, когда люди обращали внимание на биологические процессы в природе, чтобы создавать инструменты и улучшать свою жизнь. Однако, современная бионика как наука начала свое развитие только в середине 20 века.

Согласно определению Дж. Э. Стила (который ввел термин «бионика» в науку) бионика является «наукой о системах, функции которых копируют функции живых систем» [2].

В русскоязычной научной литературе термин «бионика» определяется как наука, изучающая принципы строения и функционирования живых систем с целью решения инженерных задач [3, с. 16]. Несмотря на то, что бионика как наука была сформирована в 60-е годы XX века, она имеет длительную предысторию. Уже в период Возрождения Леонардо да Винчи исследовал строение крыльев птиц и рассматривал возможность применения этих принципов в создании искусственных летательных аппаратов [4].

Один из известных русских ученых и инженеров, Н.Е. Жуковский, установил математические аналогии между движением животных и техническими устройствами. Он изучал аэродинамику и гидродинамику и в своих работах анализировал полеты птиц, что отразилось в его работе «О парении птиц» (1891). В 1960 году на Международном симпозиуме в городе Дайтоне бионика была официально признана наукой, подтверждая свою важность и актуальность. С этого момента бионика начала активно развиваться.

В СССР в 1980-х годах в Центральной научно-исследовательской лаборатории архитектурной бионики возникла концепция «архитектурной бионики», которую основал Ю.С. Лебедев. Результаты многолетних исследований в этой области были опубликованы в монографии «Архитектурная бионика» (1990) [5]. Это отметило завершение формирования «архитектурной бионики» в СССР.

Таким образом, история бионики включает предшествующие периоды, начиная с работ Леонардо да Винчи и Н.Е. Жуковского, и ее официальное утверждение как науки в 1960 году, а также развитие «архитектурной бионики» в СССР.

Можно сказать, что с учетом новых технических разработок, внедряемых в эпоху Индустрии 4.0, бионика, с экономической точки зрения, претерпевает серьезное обновление и постепенно становится одним из незаменимых инструментов промышленного развития, что обуславливает актуальность исследования.

На сегодняшний день множество компаний по всему миру занимаются исследованиями функциональных особенностей биообъектов [6]. Одним из ведущих лидеров в области бионических исследований является компания «Festo». Они разработали программу под названием «Бионическая Обучающая Сеть» (Bionic Learning Network), которая занимается разработкой технологий автоматизации для современного производства. Сами создатели программы отмечают, что природа легко и эффективно выполняет повседневные задачи на фабриках, такие как захват, перемещение и позиционирование товаров, а также управление процессами. За последние 15 лет компания «Festo» разработала ряд бионических проектов, включая «Aqua Jelly», «Aqua Penguin», «Aqua Ray», «Aircic's arm», «Smart Bird», «BionicFinWave», «BionicMotionRobot», «BionicWheelBot», «3D Cocooner» и другие [7].

Примером имитации природных форм может служить изобретение репейниковой застежки, известной как «липучка» «Velcro», которая была разработана швейцарским инженером Ж. Местралем в 1941 году (патент получен в 1955 году) и была вдохновлена принципом присоединения репейника в природе [8]. Таким образом, видно, что автор при создании этого изделия позаимствовал принцип работы из механизма природного растения репейника.

Современные технические решения, основанные на имитации природных объектов, являются другими примерами таких разработок. Например, специалисты компании «Whale Power» использовали форму бугорков на горбатых китах при проектировании лопастей ветряных турбин. По сравнению с гладкими поверхностями той же формы, использование имитации бугорков привело к увеличению подъемной силы на 8% и уменьшению колебаний турбин в нежелатель-

ных направлениях на 32% [7]. История этой разработки связана с профессором Ф. Фишем, который обратил внимание на зазубрину на скульптуре кита и начал исследование.

Профессор Фиш был уверен, что эта неровность является ошибкой в воспроизведении формы плавников, так как обычно известно, что кромка плавника должна быть гладкой. Однако спор с автором скульптуры привел Фиша к проведению исследования. В результате исследования оказалось, что скульптор был прав, и неровности на концах плавников кита создают управляемые вихри, что обеспечивает сильную подъемную силу и делает китов аэродинамичными. Используя это открытие, Фиш смог разработать инновационную форму турбин и вентиляторов, имитирующую форму плавников горбатого кита. Научные исследования подтверждают, что такое оборудование работает более тихо, надежнее и производит на 20% больше электроэнергии [9].

В 1960-х годах научные исследования в области бионики продолжились, и начали создаваться бионические системы и устройства, которые использовались, прежде всего, в промышленности. Одним из первых примеров бионической промышленности был робот «Электро» (Electro), созданный в 1960 году. Этот робот был создан на основе биологических принципов движения и поведения и использовался для рекламных целей.

В 1970-х годах в США была создана первая компания, специализирующаяся на бионической промышленности – «Bionics, Inc.». Эта компания занималась производством и продажей бионических систем и устройств, которые нашли применение в различных областях, включая медицину, промышленность и военную сферу.

С тех пор бионическая промышленность продолжает развиваться и находить все большее применение в различных областях, включая медицину, энергетику, транспорт и промышленность. В настоящее время бионическая промышленность является важной и быстроразвивающейся отраслью, привлекающая внимание крупных промышленных предприятий и инвесторов [10].

Результаты исследования и их обсуждение

В промышленности бионические технологии используются для создания новых материалов и конструкций, основанных на принципах, которые используются в природе. Такие материалы могут быть более прочными, легкими и устойчивыми к различным воздействиям.

Также бионическая промышленность находит применение в энергетической отрасли, где исследования в области биологических процессов помогают создавать более эффективные и экологически чистые источники энергии.

В Российской Федерации также есть традиции исследования и внедрения инновационных бионических разработок. Так, например, в СССР в период с 1950-х по 1980-е годы были проведены исследования в области бионики и созданы некоторые бионические устройства. Одним из примеров является разработка бионических протезов конечностей, созданных в ЦНИИТОЧМАШ (Центральный НИИ Точного Машиностроения) в 1960-х годах [11].

Эти протезы были созданы на основе анализа структуры и механизмов движения человеческих конечностей и использования бионических материалов. Кроме того, в СССР были созданы бионические микроэлектромеханические системы (MEMS), которые использовались для измерения физиологических параметров организма, таких как пульс и дыхание [12].

В 1970-е годы был создан бионический комплекс «Дельфин», который использовался для изучения поведения дельфинов в искусственных условиях. Были созданы также бионические модели многих животных, включая рыб, насекомых, моллюсков и других.

В целом, бионическая промышленность в СССР была не очень широко развита и не получила такого же уровня финансирования и внимания, как в западных странах. Однако, некоторые из достижений в области бионики в СССР были значительными и оказали влияние на дальнейшее развитие этой области [13].

Перспективы и темпы роста разработок, производства и продаж бионической продукции просто огромны. Напри-

мер, мировые продажи только силовых экзоскелетов за последние 5 лет выросли в 5 раз, с 52 млн. долларов США в 2018 году до 280 млн. долларов США в 2023 году (прогноз).

Современная бионическая промышленность в России начала активно развиваться в 1990-х годах. В этот период были созданы многие научные и инженерные центры, которые занимаются исследованиями и разработками в области бионики и биотехнологии, включающие в себя разработку бионических роботов для исследования космоса, бионических протезов для животных и технологий бионического охлаждения электронных компонентов и т.д.

В целом, бионическая промышленность в РФ продолжает развиваться, в последние годы были созданы новые научно-исследовательские центры и инновационные компании, которые работают в этой области. Результаты некоторых положительных примеров внедрения бионических разработок промышленными предприятиями в России представлены в таблице 1.

Эти и другие достижения показывают, что бионика и бионические технологии в России получают все большее внимание и поддержку со стороны государства и частных компаний, и вносят значительный вклад в развитие науки, технологий и экономики страны.

Таким образом, бионическая промышленность продолжает развиваться и находить все большее применение в различных областях, благодаря использованию биологических процессов и механизмов в природе для создания новых продуктов и технологий.

Бионическая промышленность и Индустрия 4.0 имеют много общего, поскольку обе области тесно связаны с применением передовых технологий в производстве.

Индустрия 4.0 – это концепция цифровой трансформации производства, которая включает в себя использование различных технологий, таких как интернет вещей, искусственный интеллект, облачные вычисления, автоматизация процессов и т.д. Эти технологии используются для улучшения эффективности производства, уменьшения издержек и повышения качества продукции [19].

Таблица 1

Бионические разработки промышленными предприятиями РФ

Наименование предприятия	Вид разработки	Назначение
Русская ортопедическая компания [14, 15]	Бионические протезы конечностей	Являются одними из наиболее продвинутых протезов в мире
Компания «КАМАЗ» [16, 17]	Бионические системы контроля и управления для беспилотных автомобилей «КАМАЗ»	Используют принципы живой природы в алгоритмах искусственного интеллекта.
Компания «Роскосмос» [18]	Бионические материалы	Используются в производстве легких и прочных конструкций для самолетов и космических аппаратов

Таблица 2

Принципы бионического производства

№	Наименование принципа	Характеристики
1	Инспирация природой	Использование природных образцов и механизмов в качестве источника вдохновения для проектирования и оптимизации производственных систем. Принципы эволюции, адаптации и оптимизации, присущие в природе, могут быть применены для создания более эффективных и устойчивых производственных процессов.
2	Интеграция технологий	Объединение передовых технологий и инновационных подходов для создания гибких и автоматизированных производственных систем. Это включает использование цифровых технологий, интернета вещей, искусственного интеллекта и робототехники для оптимизации процессов и повышения производительности.
3	Адаптивность и гибкость	Создание систем, способных быстро адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям. Биологические системы отличаются высокой гибкостью и способностью к адаптации, и эти принципы могут быть внедрены в производственные процессы для повышения их эффективности и реагирования на переменные факторы.
4	Устойчивость и экологическая ответственность	Снижение негативного воздействия производства на окружающую среду путем использования энергоэффективных технологий, переработки отходов и оптимизации использования ресурсов. Бионическое производство стремится к созданию устойчивых систем, которые минимизируют негативное воздействие на окружающую среду и продуктивно используют доступные ресурсы.
5	Коллаборация и обмен знаниями	Сотрудничество между различными отраслями, научными и промышленными секторами, а также академическими исследователями для обмена знаниями, опытом и передачи бионических решений. Такая совместная работа и обмен информацией способствуют ускоренному развитию эффективного бионического производства.

Примечание: *разработано автором на основе [22, 23, 24, 25]

Бионическая промышленность, в свою очередь, использует знания о биологических процессах и механизмах в природе для создания новых материалов, систем и устройств. Эти технологии позволяют создавать более эффективные и экологически чистые продукты.

В контексте Индустрии 4.0, бионическая промышленность может использоваться для создания инновационных решений и продуктов, которые будут полностью соответствовать требованиям

цифровой трансформации производства. Например, бионические материалы могут быть использованы для создания более легких и прочных деталей для автомобилей, а бионические протезы могут быть связаны с интернетом вещей для мониторинга и оптимизации их работы [20].

Таким образом, бионическая промышленность и Индустрия 4.0 могут взаимодействовать и усиливать друг друга, создавая новые возможности для инноваций и развития.

Таблица 3

Преимущества от применения бионических принципов в производстве

№	Наименование преимущества	Характеристики
1	Увеличение эффективности	Применение бионических принципов позволяет создавать оптимизированные системы, которые работают более эффективно и энергоэффективно. Это может привести к снижению затрат на производство, повышению производительности и сокращению времени цикла производства.
2	Инновационность	Бионическое производство способствует появлению новаторских и креативных решений, основанных на природных принципах. Использование биологических образцов и механизмов в проектировании может привести к созданию уникальных продуктов, более эффективных материалов и инновационных технологий.
3	Адаптивность к изменениям	Биологические системы отличаются способностью к адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды. Применение принципов бионики в производстве позволяет создавать гибкие и адаптивные системы, способные реагировать на изменения спроса, технологий и рыночных условий.
4	Оптимизация ресурсов	Бионическое производство позволяет оптимизировать использование ресурсов, таких как энергия, сырье и время. Инженерные решения, основанные на биологических принципах, позволяют создавать более энергоэффективные системы, сокращать потери и улучшать использование ресурсов, что приводит к экономии затрат и снижению негативного воздействия на окружающую среду.
5	Конкурентоспособность	Применение бионических принципов в производстве может повысить конкурентоспособность компании. Инновационные решения, эффективные процессы и устойчивость к изменениям помогают предприятиям выделяться на рынке и достигать успеха в современной бизнес-среде.
6	Индивидуализация и персонализация	Бионика предоставляет возможности для индивидуализации и персонализации продукции. Бионика предоставляет обширный набор уникальных решений, которые могут быть применены для разработки продукции, учитывающей индивидуальные потребности и предпочтения потребителей. Это может включать разработку настраиваемых параметров, функций и дизайна, что способствует удовлетворению уникальных требований каждого клиента.

Академик В.Н. Квинт в своей статье [21] ввел понятие «бионических промышленных систем», под которыми понимается совокупность экономических субъектов, формирующих замкнутый цикл производства искусственных продуктов машинным способом на основе цифрового стратегирования, сочетающих и объединяющих новые технологии с человеческими возможностями для преобразования операций, развивающих опыт, клиентские отношения и более продуктивную работу, значительно увеличивающих темпы инноваций.

Можно сделать вывод, что бионические промышленные системы представляют собой новый подход к организации производства и развитию бизнеса. Эти системы объединяют новейшие техно-

логии с человеческими возможностями с целью улучшения операций, развития опыта, укрепления клиентских отношений и повышения производительности. В результате применения бионических промышленных систем можно ожидать значительного увеличения темпов инноваций и общего развития отрасли.

В эпоху быстрого развития технологий и автоматизации производства, Индустрия 4.0 стала центральным понятием, описывающим новую фазу промышленной эволюции. Она характеризуется совершенствованием цифровых систем, интернетом вещей, аналитикой данных и автоматизацией процессов, создавая инновационное окружение для различных отраслей. Однако, в своем стремлении к оптимизации и повышению эф-

фективности, Индустрия 4.0 находится перед новым вызовом – преодолением ограничений и осложнений, возникающих в области производства.

Переход от Индустрии 4.0 к эффективному бионическому производству представляет собой новый этап в развитии современной промышленности, объединяющий передовые технологии и биологическую эффективность.

Основные принципы эффективного бионического производства представлены в таблице 2.

Применение бионических принципов в производственных процессах может привести к ряду значительных преимуществ и результатов, представленных в таблице 3.

Таким образом, эффективное бионическое производство представляет собой перспективное направление, которое может принести множество преимуществ и перевести промышленность на новый уровень развития и инноваций.

Индустрия 4.0, с ее цифровыми технологиями, интернетом вещей и автоматизацией, открыла новые горизонты для оптимизации производства и улучшения его процессов. Однако, чтобы добиться истинного прорыва в эффективности и инновациях, нужно взглянуть за пределы традиционных инженерных и технологических методов.

Бионика, наука, изучающая принципы строения и функционирования живых систем, предлагает уникальный и вдохновляющий подход к проектированию и оптимизации производственных систем. Она позволяет анализировать эффективные механизмы и решения, природа и эволюция которых уже долгое время совершенствуют. Применение биологических принципов в инженерии может привести к созданию инновационных и эффективных систем, способных адаптироваться к изменяющимся условиям, оптимизировать использование ресурсов и снижать негативное воздействие на окружающую среду.

Хотя преимущества внедрения бионических принципов в производство очевидны, существуют и проблемы, с которыми могут столкнуться промышленные предприятия. Одной из самых больших проблем является стоимость внедрения этих технологий. Первоначальные

инвестиции могут быть значительными, и малые предприятия могут с трудом оправдать затраты. Кроме того, может возникнуть кривая обучения, связанная с внедрением этих технологий, что может привести к снижению производительности в краткосрочной перспективе.

Поэтому необходимо разработать и принять стратегию развития бионической промышленности на государственном уровне для развития перспективного направления развития не только точного машиностроения, но и целого сектора экономики, включающего машиностроение, в том числе военно-промышленный комплекс, науку, образование, медицину, транспорт и связь.

Выводы

В заключении можно сказать, что применение бионических принципов в производстве может привести к значительным экономическим эффектам. Исследования биологических систем и их адаптации для технического применения позволяют создавать оптимизированные и эффективные системы производства. Преимущества бионического производства включают увеличение эффективности, снижение затрат на производство, повышение производительности и сокращение времени цикла производства. Кроме того, применение бионических принципов способствует развитию инноваций, включая разработку новых материалов, технологий, конструкций и процессов производства.

Инновации, возникающие в результате применения бионических принципов, имеют потенциал дать промышленным предприятиям конкурентное преимущество и открыть новые возможности для освоения рынков. Бионическое производство способствует развитию экономики и улучшению общественного благосостояния.

Таким образом, бионическое производство, основанное на изучении и адаптации биологических принципов, представляет собой перспективную и инновационную область, способную принести значительные выгоды, улучшить производственные процессы и способствовать развитию общества.

Библиографический список

1. Шарапова Т.Н. Становление и развитие терминологии бионики: Монография. Омск: ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 2014. С. 116.
2. Жерарден Л. Бионика. М.: Мир, 1971. 232 с.
3. Лебедев Ю.С. Архитектурная бионика. М.: Стройиздат, 1990. 269 с.
4. Леонардо да Винчи. 147 Избранные произведения: в 2 т. / пер. Губера А.А., Зубова В.П., Шилейко В.К., Эфроса А.М. / под ред. Дживелегова А.К., Эфроса А.М. М.: Изд-во Студии Артемия Лебедева, 2010, Т. 2. 480 с.
5. Павлова В.А., Голошубин В.С. Природоэквивалентная архитектура в современных творческих концепциях // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019. № 1 (46). С. 340-355.
6. Смирнов С.А., Казакова Н.Ю., Стрижак А.В., Щербаков Д.Н. К вопросу об уточнении дефиниции и границ современного промышленного дизайна // *Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник МГХПА*. 2021. Т. 2. № 1. С. 103-113.
7. О компании «Festo». [Электронный ресурс]. URL: https://www.festo.com/cms/ru_ru/9465.htm (дата обращения: 03.07.2023).
8. Velcro Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.velcro.com/original-thinking/the-velcro-brand-trademark-guidelines/> (дата обращения: 23.07.2023).
9. Bright R. Biomimicry whalepower // *Interalia Magazine*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.interaliamag.org/interviews/on-biomimicry/attachment/biomimicry-whalepower/> (дата обращения: 17.07.2023).
10. Проблемы и показатели развития робототехники: монография / рук. авт. колл., отв. ред. А.Е. Варшавский. М.: ЦЭМИ РАН, 2022. 230 с. DOI: 10.33276/978-5-8211-0806-7.
11. Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. и др. Архитектурная бионика / Под редакцией Ю.С. Лебедева. М.: Стройиздат, 1990. 268 с.
12. Борзенко А.С. // *Технология MEMS // ВУТЕ / Россия*. 2006. № 1. С. 26-32.
13. Рябов В.А. Изучение акустических сигналов и предполагаемого разговорного языка дельфинов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2016. № 3 (248). С. 88-101. DOI: 10.5862/JPM.248.10.
14. Афонин А.Н., Алейников А.Ю., Гладышев А.Р., Попова А.В. Разработка и реализация макета бионического протеза кисти руки // *Экстремальная робототехника*. 2016. № 1. Т. 1. С. 428-431.
15. Уразбахтина Ю.О., Кармолова К.Р., Морозова Е.С. Бионические протезы верхних конечностей: сравнительный анализ и перспективы использования // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. №1 (115). С. 122-130.
16. Назарова Е.В., Глинка А.В., Седова Д.Д. Беспилотный транспорт в условиях цифровизации экономики на примере ПАО «КАМАЗ»: возможности и угрозы // *Экономика знаний: теория и практика*. 2017. № 4. С. 12-23.
17. Турлаев Р.С. Перспективы развития беспилотной логистики в автомобильных грузоперевозках // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2019. № 11 (2). С. 187-192.
18. Ключников В.Ю. LIFE-технологии – будущее космической техники // *Воздушно-космическая сфера*. 2018. № 4. С. 28-43.
19. Ghobakhloo M., Fathi M., Iranmanesh M., Maroufkhani P., Morales M.E. Industry 4.0 ten years on: A bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants // *Journal of Cleaner Production*. 2021. V. 302. P. 127052. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127052.
20. Guanheng J. Fundamentals and Applications of Bionic Drilling Fluids // *Science Direct*. 2021. P. 229-254. DOI: 10.1016/B978-0-323-90293-9.00007-1.
21. Квинт В.Л., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В. Стратегия формирования платформенной операционной модели для повышения уровня цифровой зрелости промышленных систем // *Экономика промышленности*. 2022. № 15 (3). С. 249-261. DOI: 10.17073/2072-1633-2022-3-249-261.
22. Квинт В.Л., Хворостяная А.С., Сасаев Н.И. Авангардные технологии в процессе стратегирования // *Экономика и управление*. 2020. № 26 (11). С. 1170-1179. DOI: 10.35854/1998-1627-2020-11-1170-1179.
23. Теоретические основы формирования промышленной политики / под ред. д-ра экон. наук, проф. А.В. Бабкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 462 с.
24. Воробьев А.Е., Воробьев К.А. Бионическое обоснование современных технологий // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2020. № 1 (69). С. 44-57. DOI: 10.24143/1812-9498-2020-1-44-57.
25. Глухов В.В., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В., Гилева Т.А., Плетнев Д.А. Методология стратегического управления цифровым потенциалом сложных экономических систем на основе платформенной концепции // *МИР (Модернизация. Инновации. Развитие)*. 2022. Т. 13. № 4. С. 592-609.