

УДК 338.4

О. С. Голубова, Е. А. Смирнова

Белорусский национальный технический университет

**КОНЦЕПЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
БЕСПИЛОТНОЙ ТЕХНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

В статье рассмотрены теоретические и методические основы формирования концепции эффективного использования беспилотной техники в строительстве. Обоснована актуальность перехода строительного комплекса Республики Беларусь к шестому технологическому укладу на основе цифровизации и автоматизации строительных процессов. Этот уровень должен иметь методологическую подготовку и организационно-экономический механизм, который позволит избежать сложностей на этапе внедрения. Проанализированы международные тенденции роботизации и внедрения беспилотных строительных машин, показано их влияние на повышение производительности, снижение издержек и увеличение безопасности труда.

Авторами предложена концепция, включающая систему прямых и косвенных показателей эффективности внедрения беспилотной техники, а также методику расчета интегрального показателя, позволяющего комплексно оценить экономические, социальные, институциональные и инновационные эффекты. Разработан организационно-экономический механизм интеграции беспилотных машин в цифровую экосистему строительства, предусматривающий модернизацию строительных площадок, развитие нормативной базы, использование технологий Интернета вещей (IoT) и подготовку кадров.

Ключевые слова: беспилотная техника в строительстве, цифровизация строительства, технологические уклады, эффективность использования беспилотной техники.

Для цитирования: Голубова О. С., Смирнова Е. А. Концепция эффективного использования беспилотной техники в строительстве // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2025. № 2 (298). С. 48–57.

DOI: 10.52065/2520-6877-2025-298-6.

V. S. Holubava, E. A. Smirnova

Belarusian National Technical University

**THE CONCEPT OF EFFECTIVE USE
OF UNMANNED EQUIPMENT IN CONSTRUCTION**

The article discusses the theoretical and methodological foundations of the formation of the concept of the effective use of unmanned equipment in construction. The relevance of the transition of the construction complex of the Republic of Belarus to the sixth technological order based on digitalization and automation of construction processes is substantiated. This level must have methodological preparation and an organizational and economic mechanism that will avoid difficulties at the implementation stage. The international trends of robotization and the introduction of unmanned construction machines are analyzed, their impact on increasing productivity, reducing costs and improving labor safety is shown.

The authors propose a concept that includes a system of direct and indirect indicators of the effectiveness of the introduction of unmanned equipment, as well as a methodology for calculating an integral indicator that allows a comprehensive assessment of economic, social, institutional and innovative effects. An organizational and economic mechanism for integrating unmanned equipment into the digital ecosystem of construction has been developed, providing for the modernization of construction sites, the development of a regulatory framework, the use of Internet of Things (IoT) technologies and personnel training.

Keywords: unmanned equipment in construction, digitalization of construction, technological structures, efficiency of using unmanned equipment.

For citation: Holubava V. S., Smirnova E. A. The concept of effective use of unmanned equipment in construction. *Proceedings of BSTU, issue 5, Economics and Management*, 2025, no. 2 (298), pp. 48–57 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6877-2025-298-6.

Введение. Современный мир динамично развивается в направлении автоматизации процессов производства. Более того, ряд процессов уже не требует непосредственного участия человека, что становится возможным благодаря

синергии цифровизации и автоматизации. Проблемой цифровизации экономики в Республике Беларусь активно занимаются И. В. Новикова, А. В. Равино, В. Б. Криштаносов, Т. Н. Беляцкая [1–4]. Работы этих авторов вносят огромный

вклад в развитие цифровой экономики Беларуси, формируют стратегию развития и определяют постановку задач. Цифровизация экономики строительства, в частности стройплощадки, – относительно узкая отраслевая задача. Цифровизация процессов позволяет активно внедрять беспилотные машины и механизмы в строительное производство, что обеспечивает повышение производительности труда и снижение затрат на производство. Этот сегмент цифровизации в настоящее время наименее развитый из-за того, что каждый строительный проект уникален не только с точки зрения местоположения, но и своей конструктивной, организационно-технической специфики.

Когда мы увидим, как бульдозеры, экскаваторы и самосвалы самостоятельно, без участия человека, готовят котлован для фундамента очередного небоскреба или траншеи для многокилометрового трубопровода? По мнению искусственного интеллекта (ИИ), пилотные модели появятся через 5 лет, а массовое использование начнется через 10–20 лет [5].

Основная часть. Беспилотные машины – это роботы, поскольку они обладают следующими характеристиками, присущими робототехническим системам:

- автономность и управление: способны самостоятельно выполнять задачи без постоянного участия человека, используя встроенные системы навигации, сенсоры и алгоритмы ИИ;
- исполнение функций в сложных условиях: способны адаптироваться к изменяющейся внешней среде, осуществляя перемещение, манипуляции или выполнение строительных операций;
- интеграция систем обработки информации: в их состав входят сенсоры, камеры, система сбора данных и программное обеспечение для анализа и принятия решений.

Таким образом, беспилотные строительные механизмы, являясь роботами, объединяют механическую часть, системы автоматического управления и интеллектуальные алгоритмы для выполнения сложных задач в автоматическом режиме.

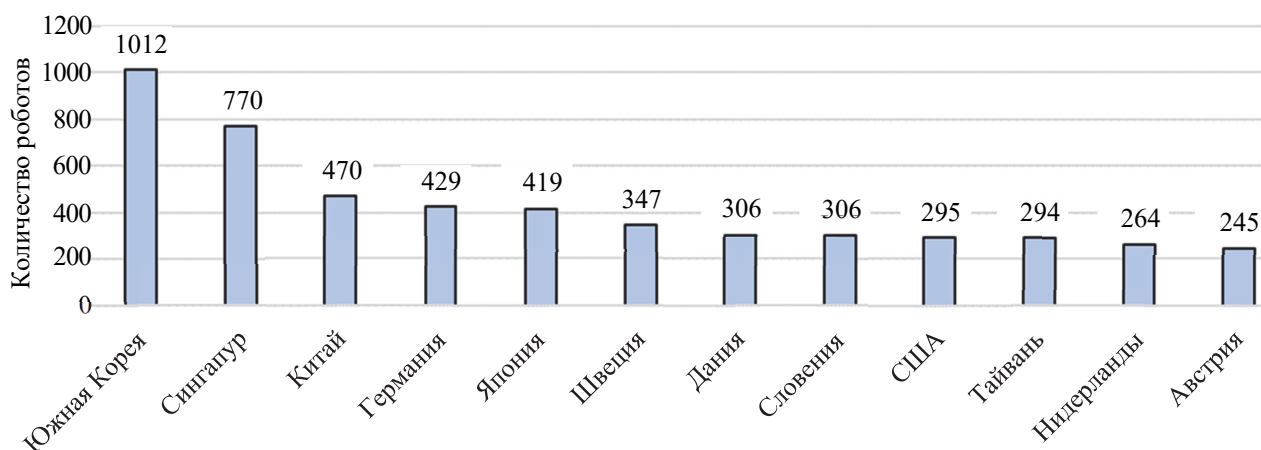
Промышленное производство в мире быстро автоматизируется. Согласно отчету World Robotics 2024, количество действующих промышленных роботов достигло 4,3 млн штук (+10% за год). По уровню автоматизации лидируют Южная Корея (1012 роботов на 10 000 рабочих) и Сингапур (770 роботов). На третье место вырвался Китай (470 роботов), обогнав Германию (429 роботов). В прошлом году на Китай пришелся 51% всех новых роботов в мире (+276 288 штук) [6].

В Европейском союзе средняя плотность роботов составила 219 единиц на 10 000 сотрудников, что в среднем на 5,2% больше по сравнению с 2023 г. При этом Германия, Швеция, Дания и Словения входят в первую десятку мировых лидеров по масштабам их применения.

Плотность роботов в Северной Америке составила 197 единиц на 10 000 рабочих с ростом на 4,2% в год. США занимают десятое место в мире среди наиболее автоматизированных стран в обрабатывающей промышленности. Наглядно демонстрирует плотность роботов статистика, представленная на рис. 1.

Средняя плотность роботов в Азии составила 182 единицы на 10 000 человек, занятых в производстве, что больше среднего значения на 7,6%. Экономики Кореи, Сингапура, материкового Китая и Японии входят в десятку наиболее автоматизированных стран [7].

Уровень развития техники и технологий отражают технологические уклады. На рис. 2 представлена структура технологических укладов в России, США и Японии.



Источник. Собственная разработка авторов.

Рис. 1. Плотность промышленных роботов на 10 000 сотрудников по странам в 2023 г.

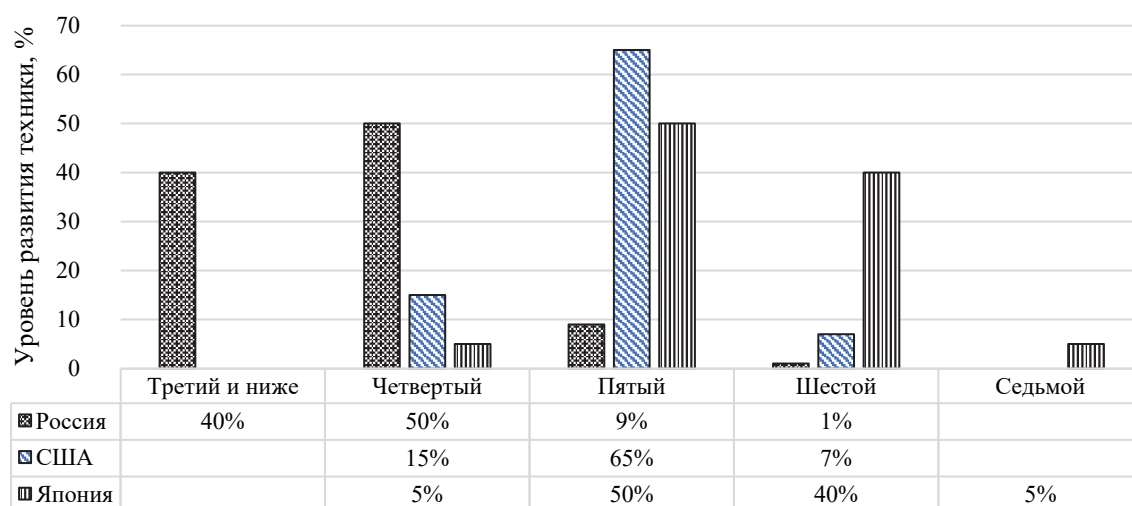


Рис. 2. Структура технологических укладов в России, США и Японии [8]

Как видно из рис. 2, ведущие промышленно развитые страны уже осуществили переход к шестому технологическому укладу и активно его реализуют, формируя условия для следующего седьмого технологического уклада. В США доля пятого технологического уклада равна 60%, а шестого – 5%. В Японии доля шестого технологического уклада составляет 40% и уже начато формирование седьмого технологического уклада, доля которого равна 5%. В современной России доля пятого технологического уклада составляет 9%, доля шестого уклада – 1%, седьмой технологический уклад не представлен. Авторы полагают, что в Республике Беларусь ситуация аналогична российской. Для эффективной работы беспилотных машин необходим высокий уровень цифровизации, который предусматривает шестой технологический уклад. Государством предпринят ряд мер и созданы целеполагающие документы, которые способствуют повышению уровня цифрового развития страны в целом.

На основе методических рекомендаций Министерства экономики Республики Беларусь с использованием ключевых положений Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 г., Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг. (утверждена Указом Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292), Комплексного прогноза научно-технического прогресса Республики Беларусь на 2026–2030 гг. и на период до 2045 г. [9] разработана Стратегия развития строительного комплекса Республики Беларусь до 2035 г. (далее – Стратегия) [10]. Реализация Стратегии направлена на достижение основных целей, каждая из которых имеет свои задачи и индикаторы, формализующие результаты

оценки выполнения направлений. Одной из целей является «Развитие цифровизации организаций строительного комплекса». Однако следует отметить, что строительная отрасль цифровизируется неравномерно и непосредственно технологический процесс на стройплощадке по уровню цифровизации отстает от проектирования и управленческих процессов.

По мнению И. В. Мальцевич, «коэффициенты цифровой зрелости существенно отличаются по областям и видам экономической деятельности секции F» [11]. Исследования по оценке цифровой зрелости, проводимые А. Г. Ефременко, М. И. Какора, позволили им сделать вывод, что показатели не демонстрируют сильную вариативность значений по географическому принципу, но в несколько раз отличаются в зависимости от вида экономической деятельности [12, 13].

В опубликованных ранее исследованиях автора [14] отмечалось, что Беларусь занимает лидирующие позиции по внедрению технологий в сферах 5G-коммуникаций, робототехники и электромобилей. Страна стремится к созданию мобильных приложений, наукоемкой занятости, использованию информационно-коммуникационных технологий, отстает в таких областях, как финансирование стартапов, предпринимательство и рыночная капитализация. Но если рассматривать цифровизацию строительства, исходя из статистических исследований и данных, представленных в отчетах различных организаций, то строительство находится в начальной стадии процесса цифровизации. Однако, учитывая общую цифровую зрелость экономики Республики Беларусь, мы имеем потенциальную возможность трансформации строительной отрасли с переходом на новый, более высокий уровень цифровой зрелости.

Современная строительная отрасль в части развития непосредственно процесса строительства находится преимущественно на четвертом технологическом укладе, что подтверждается механизацией технологического производства, автоматизацией отдельных процессов и использованием квалифицированной рабочей силы. Однако демографические векторы развития указывают на дефицит рабочей силы, значительное сокращение удельного веса занятых в строительной отрасли, а также высокие ожидания по заработной плате квалифицированного персонала [15–17].

Мы активно вступаем в пятый технологический уклад, который учитывая тенденции развития технологий, дает задел для достижения цифровой зрелости и возможности применения беспилотных строительных машин. Наиболее широкое и массовое использование беспилотных строительных машин наступит в шестом технологическом укладе.

В шестом технологическом укладе экономика претерпит радикальные изменения и будет трансформироваться по следующим направлениям:

1) гиперавтоматизация и синергия технологий: интеграция квантовых вычислений, нанотехнологий, биотехнологий и ИИ для создания саморегулирующихся и самообучающихся систем, что значительно повысит производительность и эффективность;

2) переход к постиндустриальной и биоиндустриальной экономике: развитие биотехнологий, генной инженерии, синтетической биологии и наноматериалов, что позволит создавать новые виды продукции, материалы и лекарственные средства;

3) экономика знаний: усиление роли образовательных и исследовательских секторов, где ценность определяется интеллектуальной собственностью, инновациями и креативностью;

4) цифровая и биологическая интеграция развития технологий: слияние человека и машины, что открывает новые возможности для производства и потребления;

5) устойчивое развитие и экологическая интеграция: создание замкнутых систем производства, использование нанотехнологий для очистки окружающей среды, развитие экологически чистых источников энергии и материалов.

В целом экономика шестого уклада станет более интеллектуальной, биологической, с высокой степенью автоматизации, персонализации и междисциплинарных открытий.

В этих условиях с целью активизации внедрения беспилотной техники и повышения уровня цифровизации авторами была разработана концепция эффективного использования беспилотной техники.

Концепция эффективности использования беспилотных строительных машин как методологическая категория в экономике строительства представляет системный подход к оценке и анализу степени достижения оптимальных результатов при внедрении и эксплуатации беспилотных технологий в строительной сфере. Она включает в себя измерение соотношений между затратами (финансовыми, временными, ресурсными) и достигнутыми результатами (снижение затрат на рабочую силу, повышение уровня безопасности, сокращение сроков строительства). Эта категория служит основой для разработки методов оценки, планирования и управления эффективностью внедрения беспилотных машин, обеспечивая обоснованный выбор технологий и стратегий развития в строительной отрасли.

Индикаторы эффективности использования беспилотных строительных машин, предусмотренные концепцией, включают:

– экономические показатели: экономия затрат, возврат инвестиций (ROI);

– производственные показатели: повышение производительности труда, сокращение сроков строительства;

– социальные показатели: повышение уровня безопасности, уровень удовлетворенности персонала (число положительных отзывов ко всем отзывам);

– институциональные показатели: степень внедрения инноваций (количество беспилотных строительных машин), доля автоматизации процессов (объем роботизированных работ/общий объем работ).

Интегрированный показатель эффективности использования беспилотных строительных машин представляет собой комплексный показатель, объединяющий все вышеперечисленные. Он может быть выражен через взвешенную сумму или индекс, учитывающий важность каждого компонента.

Эта концепция базируется на нескольких ключевых аспектах: снижение затрат на производство, повышение производительности и безопасности труда за счет внедрения передовых технологий автоматизации и искусственного интеллекта. Концептуальность заключается в создании интегрированных систем, обеспечивающих автоматизацию управления и мониторинга работ, снижение затрат на рабочую силу и сокращение сроков реализации проектов. Стратегическая цель – обеспечить устойчивое развитие строительной отрасли через внедрение беспилотных технологий, способных работать в закрытых, ограниченных пространствах стройплощадок, повысить качество и надежность строительных объектов.

Основные задачи концепции предусматривают:

1) критерии экономической целесообразности применения беспилотных систем. Внедрение возможно только при положительном балансе «затраты – эффект»;

2) разработку показателей эффективности, включающих:

– прямые показатели эффективности – снижение затрат на рабочую силу, сокращение сроков реализации проектов, уменьшение материальных и энергетических затрат, а также повышение уровня безопасности труда за счет исключения опасных для человека операций;

– косвенные показатели эффективности – оценка снижения рисков травматизма, улучшение экологической ситуации за счет точности и автоматизации процессов, а также повышение качества работ за счет высокой точности и повторяемости процессов, выполняемых беспилотными системами;

3) модель интеграции в процессы планирования, мониторинга и контроля. Интеграция с цифровыми моделями (BIM): использование цифровых двойников и виртуальных сред для моделирования и оптимизации работы беспилотных механизмов, что способствует повышению точности и сокращению ошибок;

4) формирование системы регулирования и стандартизации: технологическая унификация и типизация процессов, внедрение стандартных протоколов управления беспилотными системами, что позволяет повысить их совместимость и эффективность эксплуатации;

5) определение перспектив развития. Стратегическая перспектива предусматривает формирование дорожных карт внедрения беспилотных технологий, развитие инфраструктуры и подготовку кадров, что обеспечивает устойчивое развитие и конкурентоспособность строительных организаций.

Данные задачи необходимо структурировать по времени процесса, по прямым и косвенным эффектам, по стоимости.

Для эффективного использования парка беспилотных машин необходимо создать цифровую среду не ниже шестого технологического уклада, соответствующего уровню его цифровой зрелости. Наглядно этапы эволюции строительного производства и уровни цифровизации представлены в таблице.

В условиях нарастающей цифровизации строительного процесса назревает необходимость технической адаптации производственных систем с учетом экономического обоснования внедряемых решений.

К принципам эффективного использования беспилотной техники в строительстве относятся:

– системность: беспилотная техника рассматривается как элемент цифровой экосистемы строительства (BIM, ERP, Project и др.). Она встраивается в процессы автоматизации производства и управления, становясь производственным ресурсом, обеспечивающим переход строительства на качественно новый уровень;

– масштабируемость: организация производства типоразмерного ряда беспилотных строительных машин и внедрение технологий их массового применения в строительстве дает возможность получить эффект на масштабе производства. Другой стороной масштабируемости является возможность применения как на крупных инфраструктурных, так и на локальных объектах;

– социальная ориентированность: беспилотная техника не создает конкуренцию работникам строительства, а обеспечивает повышение безопасности и качества условий труда, создает новые высококвалифицированные рабочие места вместо тяжелого ручного труда на открытом воздухе под воздействием атмосферно-климатических факторов, способствует цифровизации смежных отраслей, что, как следствие, приводит к улучшению социально-психологического климата в организации и в отрасли в целом.

Эволюция строительного производства по технологическим укладам

Уклад	Ключевые технологии	Уровень цифровизации	Роль человека	Степень внедрения БПСМ	Примеры
IV	Механизация	Низкий	Механизированный труд	Отсутствует	Классическая техника
V	Автоматизация отдельных процессов	Средний	Автоматизированный труд	Единичные образцы	Техника с навигацией
VI	Интеграция ИИ, BIM, IoT	Высокий	Программирование и управленческий труд	Серийное внедрение	Автономная техника
VII	Самоорганизующиеся системы	Очень высокий	Цифровая координация	Полная автоматизация	Беспилотные стройплощадки

Источник. Собственная разработка авторов.

По данным статистических исследований, проведенных в Российской Федерации, строительная отрасль в некоторых позициях цифровизации отстает от флагмана – IT-отрасли в 16 раз [14]. Проблема отставания цифровизации в строительной отрасли не решена и в Беларуси, где остро стоит вопрос цифровизации реального сектора экономики. Процесс цифровизации в строительстве идет неравномерно. На данный момент в начале строительного цикла на стадии проектирования благодаря BIM-технологиям и высокой степени автоматизации управленческого процесса он имеет более высокую степень цифровизации. Основная сложность автоматизации и цифровизации собственно производства работ на строительной площадке заключается в высоких затратах на закупку и внедрение не только техники, но и программных комплексов управления. Однако для перехода на шестой технологический уклад необходимо выравнивание всех процессов цифровизации строительства, формирование целостной цифровой экосистемы строительства:

- 1) проектирование: использование дронов для аэросъемки и 3D-моделирования территории, интеграция данных в BIM;
- 2) организация строительства: беспилотные погрузчики, экскаваторы, транспорт и другая техника;
- 3) мониторинг и контроль: регулярные облеты объектов, автоматическая фиксация объемов выполненных работ, контроль качества, цифровые отчеты с беспилотных машин в режиме реального времени;
- 4) логистика: беспилотные системы доставки материалов на площадке, улучшение организации процесса за счет работы ИИ;
- 5) безопасность: снижение присутствия людей в опасных зонах, более экологичная система за счет перехода работы на электричество с двигателей внутреннего сгорания.

В целом внедрение подразумевает не только закупку, но и создание цифровой экосреды, способной поддерживать функционал беспилотного механизма. Цифровая экосреда строительства – это комплекс информационных и коммуникационных технологий, интегрированных в процессы проектирования, планирования, управления и реализации строительных объектов. Она включает в себя использование BIM-моделей, систем автоматизации облачных платформ, датчиков и IoT-устройств для повышения эффективности, безопасности, качества строительства, а также оптимизацию затрат и сокращения сроков строительства. В рамках данной среды обеспечивается взаимодействие участников в цифровом пространстве, что способствует более точному управлению ресурсами и минимизации рисков.

При изучении эффективности внедрения беспилотных технологий необходимо учитывать не только прямой эффект снижения затрат, но и получение косвенных благ.

При рассмотрении эффективности следует принимать во внимание сроки полезного использования с учетом срока окупаемости.

Авторами предлагается выделить показатели, анализ которых можно провести без сбора дополнительных данных, из имеющихся статистических показателей предприятия.

Эффективность внедрения беспилотных строительных машин (БПСМ) целесообразно рассматривать как интегральную характеристику, включающую прямые экономические, производственные и социальные эффекты, а также косвенные институциональные и инновационные результаты. Для объективной оценки предлагается использовать многоуровневую систему показателей и три этапа расчета.

1. *Расчет прямых показателей эффективности.* К данной группе относятся количественно измеряемые показатели, оказывающие непосредственное влияние на себестоимость и сроки реализации проектов:

- снижение затрат на выполнение строительных работ (ΔC , %);
- сокращение сроков строительства (ΔT , %);
- рост производительности труда (P_T , %);
- срок окупаемости инвестиций (Payback Period, PP, лет).

Для оценки инвестиционной привлекательности также используется показатель чистой приведенной стоимости NPV (Net Present Value). Финансовый показатель ROI (Return on Investment) нужен для того, чтобы сопоставить будущую прибыль с текущими вложениями:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_0; \quad (1)$$

$$ROI = \frac{Pf - Cost}{Cost} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где CF_t – денежный поток в период t ; I_0 – первоначальные инвестиции; Pf – прибыль, денежные единицы; $Cost$ – затраты, денежные единицы.

2. *Расчет косвенных показателей эффективности.* Эти показатели фиксируют социальные и институциональные эффекты, не имеющие прямого финансового выражения, но влияющие на устойчивость и привлекательность проекта:

- снижение рисков травматизма (R_t , баллы);
- увеличение уровня цифровизации строительной экосреды (C_d , индекс);
- повышение уровня квалификации и образования персонала (Q_p , %), процент сотрудников, прошедших обучение;

– улучшение экологической ситуации (E_c , %), снижение выбросов или энергопотребления.

Для оценки косвенных эффектов предлагается использовать метод экспертного ранжирования с присвоением весов (w_i), нормированных по правилу:

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1. \quad (3)$$

Косвенный интегральный показатель определяется как:

$$IE_{cosv} = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \frac{x_i}{x_i^{\max}}, \quad (4)$$

где x_i – значение показателя; $x_i^{\max}$ – его максимальное экспертное значение.

3. Расчет интегрального показателя эффективности. Для комплексной оценки предлагается интегральный индекс эффективности использования БПСМ, включающий прямые и косвенные эффекты, рассчитывать по формуле

$$IE = \alpha \cdot IE_{pr} + (1 - \alpha) \cdot IE_{cosv}, \quad (5)$$

где α – коэффициент значимости (рекомендуется 0,7 для прямых и 0,3 для косвенных эффектов); IE_{pr} – индекс прямых эффектов; IE_{cosv} – индекс косвенных эффектов.

Значение IE оценивается по пятибалльной шкале:

- 1,0–0,8 – высокая эффективность;
- 0,8–0,6 – достаточная эффективность;
- 0,6–0,4 – низкая эффективность;
- менее 0,4 – нецелесообразно к внедрению.

Особенности методики заключаются в следующем:

1) при расчетах необходимо учитывать жизненный цикл БПСМ (приобретение, эксплуатация, модернизация, утилизация);

2) для долгосрочных проектов рекомендуется использовать дисконтированные показатели (NPV , IRR и т. д.);

3) косвенные эффекты фиксируются через анкетирование экспертов и статистические наблюдения.

Таким образом, предложенная методика позволяет формировать интегральную оценку эффективности БПСМ, объединяя экономические и социальные критерии. Она учитывает не только прямую окупаемость, но и долгосрочные конкурентные преимущества строительных организаций.

Организационно-экономический механизм внедрения беспилотной техники в строительстве – это система взаимосвязанных управленческих решений, экономических инструментов и институциональных условий, обеспечивающая интеграцию БПСМ в производственные

процессы на основе цифровой экосреды с целью повышения эффективности и конкурентоспособности строительной отрасли.

1. Субъекты механизма. Государство формирует нормативно-правовую базу, стимулирует инвестиции (субсидии, налоговые льготы, льготное кредитование).

Строительные организации (подрядчики и заказчики) инициируют внедрение, формируют спрос на БПСМ, адаптируют бизнес-модели.

Производители и поставщики техники обеспечивают создание, сертификацию и сервисное сопровождение беспилотных систем.

Научные и образовательные учреждения готовят кадры, проводят НИОКР, разрабатывают цифровые алгоритмы.

Инвесторы и финансовые институты предоставляют капитал под инновационные проекты.

2. Инструменты механизма бывают:

а) нормативно-правовые:

- стандартизация протоколов управления БПСМ;
- требования по безопасности и сертификации;
- включение БПСМ в строительные нормы и правила;

б) экономические:

- налоговые льготы, ускоренная амортизация, инвестиционные кредиты;
- механизмы лизинга и аренды беспилотной техники;

- поддержка пилотных проектов через государственные программы;

в) организационные:

- создание тестовых полигонов и пилотных стройплощадок;

- интеграция с BIM и цифровыми платформами управления;

- формирование центров компетенций и отраслевых консорциумов;

г) мотивационно-кадровые:

- подготовка операторов цифровых систем и инженеров по эксплуатации БПСМ;

- система стимулирования компаний за достижение целевых показателей (сроки, безопасность, экологичность).

3. Функционирование механизма проходит следующие этапы:

- инициация: формируется спрос на инновации (подрядчики + инвесторы);

- регламентация: государство утверждает стандарты, механизмы поддержки;

- интеграция: БПСМ включаются в календарные графики, технологические карты, BIM-модели;

- эксплуатация и контроль: данные БПСМ поступают в цифровую экосреду (IoT-датчики, цифровые двойники);

- оценка эффективности: применяется интегральный показатель, рассчитанный по формуле (5), принимаются корректирующие решения.

4. Эффекты действия механизма различают:

- экономические: снижение затрат, повышение производительности, ускорение оборачиваемости капитала;
- социальные: рост безопасности, снижение тяжелого ручного труда, новые квалификации;
- институциональные: цифровизация отрасли, формирование рынка БПСМ, стандартизация;
- инновационные: рост технологической зрелости отрасли, интеграция в международные цепочки инноваций.

Разработанный организационно-экономический механизм обеспечивает согласованное взаимодействие государства, строительных организаций и производителей техники, что позволяет не только достичь положительного баланса «затраты – эффект», но и сформировать условия для долгосрочного устойчивого развития строительной отрасли на основе цифровых технологий и беспилотных систем.

Ожидаемые косвенные результаты при внедрении БПСМ проявляются в виде ритмичного процесса строительства, повышения экологичности, снижения травматизма, автоматизации сбора, обработки и применения цифровых данных при строительстве зданий и сооружений.

Заключение. В ходе исследования обоснована актуальность внедрения БПСМ как ключевого направления цифровой трансформации строительной отрасли. Показано, что уровень цифровой зрелости строительных процессов в Республике Беларусь пока отстает от проектно-управленческих стадий, что ограничивает широкое распространение инновационных технологий. Однако анализ национальных стратегий и международного опыта позволяет утверждать, что существуют реальные предпосылки для активного развития данного сегмента.

Авторами предложена концепция эффективного использования беспилотной техники в строительстве, определяющая ее как методологическую категорию экономики строительства, основанную на системном подходе к оценке и анализу соотношений между затра-

тами и результатами внедрения. Концепция включает:

- 1) систему прямых и косвенных показателей эффективности;
- 2) методику расчета интегрального показателя на основе финансовых, производственных, социальных и институциональных критериев;
- 3) организационно-экономический механизм внедрения БПСМ, обеспечивающий взаимодействие государства, строительных организаций, производителей техники, науки и инвесторов.

Разработанная методика позволяет учитывать как финансовые эффекты (снижение себестоимости, повышение производительности, сокращение сроков строительства, возврат инвестиций), так и косвенные результаты (повышение безопасности, цифровизации экосреды, квалификации кадров, экологичности). Использование интегрального показателя обеспечивает возможность объективного выбора управленческих решений и формирования стратегии цифровой модернизации строительных организаций.

Организационно-экономический механизм внедрения БПСМ включает нормативно-правовые, экономические, организационные и кадровые инструменты, что позволяет сочетать государственные стимулы, инвестиционную активность и технологические инновации. Его реализация обеспечивает формирование целостной цифровой экосреды строительства, способной поддерживать функционирование беспилотных систем на уровне шестого технологического уклада.

Таким образом, внедрение беспилотных технологий в строительстве должно рассматриваться не только как технологическая инновация, но и как экономический инструмент повышения эффективности и устойчивости отрасли. Разработанная концепция и методика оценки могут быть использованы при подготовке государственных программ цифровизации, корпоративных стратегий строительных организаций, а также при инвестиционном обосновании проектов внедрения БПСМ.

Список литературы

1. Новикова И. В., Равино А. В. Определение страновых особенностей цифровизации в государствах ЕАЭС // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2022. № 1 (256). С. 5–12.
2. Новикова И. В., Равино А. В. Оценка уровня цифровизации в государствах ЕАЭС по показателям достижения Целей устойчивого развития // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2023. № 1 (268). С. 5–15.
3. Новикова И. В., Равино А. В. Оценка статистических показателей для выявления угроз развития цифровой экономики на уровне интеграционной группировки ЕАЭС // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2024. № 1 (280). С. 5–15.
4. Данилова О. В., Новикова И. В., Криштаносов В. Б. Цифровизация ключевых секторов экономики: smart grid в электроэнергетике России и Республики Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2021. № 2 (232). С. 5–14.
5. Прогноз беспилотного будущего. URL: <https://mashnews.ru/prognoz-bespilotnogo-budushhego-gruzoviki-stanut-avtonomnyimi-cherez-10-let.html> (дата обращения: 01.05.2025).

6. World Robotics 2024. URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf (date of access: 01.05.2025).
7. Китай опередил Германию и Японию по промышленным роботам в 2023 году. URL: https://plastinfo.ru/information/news/54456_05.12.2024/ (дата обращения: 01.05.2025).
8. Гриднева Я. А. Разработка системы управления крупномасштабными строительными проектами на протяжении их жизненного цикла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.1.16. Иваново, 2025. 15 с.
9. Как будет развиваться строительный комплекс Республики Беларусь до 2035 года. URL: <https://ibmedia.by/news/kak-budet-razvivatsya-stroitelnyj-kompleks-respubliki-belarus-do-2035-goda/> (дата обращения: 01.05.2025).
10. Пресс-конференция «Строительство как драйвер роста экономики». Конкурс «Лидеры в строительстве Республики Беларусь». URL: <https://belta.by/society/view/press-konferentsiya-o-razviti-stroitelnoj-otrasli-belarusi-projdet-v-belta-25-fevralja-698121-2025/> (дата обращения: 01.05.2025).
11. Мальцевич И. В., Основина Л. Г., Основин В. Н. Оценка потенциала цифровой адаптации строительной отрасли // Бизнес. Инновации. Экономика: сб. науч. ст. Минск, 2024. Вып. 9. С. 104–113.
12. Информационно-коммуникационные технологии. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/informatsionno-telekommunikatsionnye-tehnologii/> (дата обращения: 01.04.2025).
13. Ефименко А. Г., Какова М. И. Методические подходы к экономической оценке уровня цифровизации. URL: http://edoc.bseu.by:8080/bit-stream/edoc/94609/1/Efimenko_A._G.pdf (дата обращения: 19.04.2025).
14. Голубова О. С., Смирнова Е. А. Новое направление цифровизации строительной отрасли // Цифровизация: экономика и управление производством: материалы 89-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 3–18 февр. 2025 г. Минск, 2025. С. 558–564.
15. Schwabe K., Bock T. Construction Robotics: Current Situation and Future Trends // Automation in Construction. URL: https://www.researchgate.net/publication/221786457_Construction_Automation_and_Robotics (date of access: 18.08.2025).
16. World Economic Forum. Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf (date of access: 18.07.2025).
17. Skibniewski M. J. Research trends in information technology applications in construction safety engineering and management // Frontiers of Engineering Management. URL: https://www.researchgate.net/publication/276104355_Research_Trends_in_Information_Technology_Applications_in_Construction_Safety_Engineering_and_Management (date of access: 18.08.2025).

References

1. Novikova I. V., Ravino A. V. Definition of country-specific features of digitalization in the EAEU states. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 5, Economics and Management, 2022, no. 1 (256), pp. 5–12 (In Russian).
2. Novikova I. V., Ravino A. V. Assessment of the level of digitalization in the EAEU states by indicators of achieving the Sustainable Development Goals. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 5, Economics and Management, 2023, no. 1 (268), pp. 5–15 (In Russian).
3. Novikova I. V., Ravino A. V. Evaluation of statistical indicators to identify threats to the development of the digital economy at the level of the EAEU integration group. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 5, Economics and Management, 2024, no. 1 (280), pp. 5–15 (In Russian).
4. Danilova O. V., Novikova I. V., Krishtanosov V. B. Digitalization of key sectors of the economy: smart grid in the electric power industry of Russia and the Republic of Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 5, Economics and Management, 2021, no. 2 (232), pp. 5–14 (In Russian).
5. Forecast of the unmanned future. Available at: <https://mashnews.ru/proгноз-bespilnogo-budushhego-gruzoviki-stanut-avtonomnyimi-cherez-10-let.html> (accessed 01.05.2025) (In Russian).
6. World Robotics 2024. Available at: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf (accessed 01.05.2025).
7. China surpassed Germany and Japan in industrial robots in 2023. Available at: https://plastinfo.ru/information/news/54456_05.12.2024/ (accessed 01.05.2025) (In Russian).
8. Gridneva Ya. A. *Razrabotka sistemy upravleniya krupnomasshtabnymi stroitel'nyimi proektami na protyazhenii ikh zhiznennogo tsikla. Avtoreferat Dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Development of a system for managing large-scale construction projects throughout their life cycle. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. Ivanovo, 2025. 15 p. (In Russian).

9. How the construction complex of the Republic of Belarus will develop until 2035. Available at: <https://ibmedia.by/news/kak-budet-razvivatsya-stroitelnyj-kompleks-respubliki-belarus-do-2035-goda/> (accessed 01.05.2025) (In Russian).
10. Press conference “Construction as a driver of economic growth”. The competition “Leaders in the construction of the Republic of Belarus”. Available at: <https://belta.by/society/view/press-konferentsiya-o-razviti-stroitelnoj-otrasli-belarusi-projdet-v-belta-25-fevralja-698121-2025/> (accessed 01.05.2025) (In Russian).
11. Maltsevich I. V., Osnovina L. G., Osnovin V. N. Assessment of the potential of digital adaptation of the construction industry. *Biznes. Innovatsii. Ekonomika* [Business. Innovation. Economics: collection of scientific articles]. Minsk, 2024, issue 9, pp. 104–113 (In Russian).
12. Information and communication technologies. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/informatsionno-telekommunikatsionnye-tehnologii/> (accessed 01.04.2025) (In Russian).
13. Efimenko A. G., Kakora M. I. Methodological approaches to the economic assessment of the level of digitalization. Available at: http://edoc.bseu.by:8080/bit-stream/edoc/94609/1/Efimenko_A._G.pdf (accessed 19.04.2025) (In Russian).
14. Holubava V. S., Smirnova E. A. A new direction of digitalization of the construction industry. *Tsifrovizatsiya: ekonomika i upravleniye proizvodstvom: materialy 89-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov* [Digitalization: economics and production management: materials of the 89th scientific and technical conference of teaching staff, researchers and graduate students]. Minsk, 2025, pp. 558–564 (In Russian).
15. Schwabe K., Bock T. Construction Robotics: Current Situation and Future Trends. Available at: https://www.researchgate.net/publication/221786457_Construction_Automation_and_Robotics (accessed 18.08.2025)
16. World Economic Forum. Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf (accessed 18.07.2025).
17. Skibniewski M. J. Research trends in information technology applications in construction safety engineering and management. Available at: https://www.researchgate.net/publication/276104355_Research_Trends_in_Information_Technology_Applications_in_Construction_Safety_Engineering_and_Management (accessed 18.08.2025).

Информация об авторах

Голубова Ольга Сергеевна – кандидат экономических наук, доцент, профессор кафедры «Экономика, организация строительства и управление недвижимостью». Белорусский национальный технический университет (пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: holubava@bntu.by

Смирнова Елена Александровна – соискатель. Белорусский национальный технический университет (пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: subort@tut.by

Information about the authors

Holubava Volha Sergeevna – PhD (Economics), Associate Professor, Professor, the Department of Economics, Organization of Construction and Real Estate. Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: holubava@bntu.by

Smirnova Elena Aleksandrovna – external doctorate student. Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: subort@tut.by

Поступила 11.09.2025