

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69:331.36.502

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717

Модель выбора эффективных решений для повышения безопасности труда и экологической безопасности строительства в городских условиях

Валерий Николаевич Азаров¹, Олег Васильевич Бурлаченко¹,
Елена Владимировна Сысоева², Александр Олегович Бурлаченко¹

¹ Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью комплексного подхода к управлению безопасностью труда и экологической безопасностью на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) строительных объектов в условиях плотной городской застройки. Цель работы — разработка математической модели для выбора эффективных организационно-технологических решений, интегрирующей технико-экономические, экологические и социальные параметры.

Материалы и методы. В основе исследования лежит усовершенствованная математическая модель, базирующаяся на комплексном критерии, который включает приведенные затраты, вероятность наступления событий ЖЦ и количественную оценку техногенного воздействия. Модель дополнена коэффициентами, учитывающими уровень автоматизации γ , пространственные ограничения ψ и адаптивность к изменяющимся условиям θ . Для валидации модели применялся мониторинг качества воздуха с использованием IoT-датчиков на строительных площадках в г. Волгограде, данные интегрировались в BIM-платформу.

Результаты. Разработанная модель позволяет количественно оценить эффективность решений через минимизацию комплексного критерия K_f . Апробация на объектах (земляные и штукатурные работы) показала, что внедрение мер пылеподавления (туманообразование, вытяжные установки) снижает значение критерия в 1,40–2,48 раза. Расхождение прогнозных и фактических данных мониторинга не превысило 15 %, что подтверждает адекватность модели.

Выводы. Предложенная модель является эффективным инструментом для адаптивного управления строительными проектами. Она обеспечивает комплексный учет рисков, динамическое обновление данных на основе BIM и IoT и адаптацию к условиям плотной городской застройки. Результаты исследования рекомендуются к применению для повышения экологической безопасности и безопасности труда на протяжении всего ЖЦ объекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологическая безопасность, управление безопасностью труда, модель выбора эффективных решений, жизненный цикл, пылевое загрязнение, IoT-датчики, количественная оценка техногенного воздействия

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс), научный проект «Теоретические основы выбора эффективных решений, направленных на повышение рациональности использования и экологической безопасности городских территорий» (соглашение № 25-29-20187).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Сысоева Е.В., Бурлаченко А.О. Модель выбора эффективных решений для повышения безопасности труда и экологической безопасности строительства в городских условиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1707–1717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717

Автор, ответственный за переписку: Олег Васильевич Бурлаченко, oburlachenko@yandex.ru.

A model for selecting effective solutions to enhance occupational safety and environmental safety of construction in urban areas

Valerij N. Azarov¹, Oleg V. Burlachenko¹, Elena V. Sy'soeva², Alexander O. Burlachenko¹

¹ Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is driven by the need for an integrated approach to managing occupational safety and environmental safety at all stages of the life cycle of construction projects in dense urban environments. The aim

of the work is to develop a mathematical model for selecting effective organizational and technological solutions that integrates technical, economic, environmental, and social parameters.

Materials and methods. The research is based on an improved mathematical model founded on a comprehensive criterion that includes reduced costs, the probability of life cycle events occurring, and a quantitative assessment of technogenic impact. The model is enhanced with coefficients accounting for the level of automation γ , spatial constraints ψ , and adaptability to changing conditions θ . For model validation, air quality monitoring was performed using IoT sensors on construction sites in Volgograd; the data was integrated into a BIM platform.

Results. The developed model allows for a quantitative assessment of the effectiveness of solutions through the minimization of the comprehensive criterion K_p . Testing on specific operations (earthworks and plastering) showed that the implementation of dust suppression measures (fogging systems, exhaust units) reduces the criterion value by a factor of 1.40–2.48. The discrepancy between forecasted and actual monitoring data did not exceed 15 %, confirming the model's adequacy.

Conclusions. The proposed model is an effective tool for the adaptive management of construction projects. It ensures comprehensive risk accounting, dynamic data updates based on BIM and IoT, and adaptation to dense urban conditions. The study's results are recommended for application to enhance environmental safety and occupational safety throughout a facility's entire life cycle.

KEYWORDS: decision-making model, life cycle, dust pollution, IoT sensors

Acknowledgments. This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation for "Conducting Fundamental Scientific Research and Exploratory Scientific Research by Small Individual Research Groups" (regional competition), under the research project "Theoretical Foundations for Selecting Effective Solutions Aimed at Improving the Rational Use and Environmental Safety of Urban Areas" (agreement No. 25-29-20187).

FOR CITATION: Azarov V.N., Burlachenko O.V., Sy'soeva E.V., Burlachenko A.O. A model for selecting effective solutions to enhance occupational safety and environmental safety of construction in urban areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(11):1707-1717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717 (rus.).

Corresponding author: Oleg V. Burlachenko, oburlachenko@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В строительной сфере качество управленческой деятельности является сложной задачей, поскольку процесс управления жизненным циклом (ЖЦ) объектов недвижимости представляет собой многозвенную, продолжающуюся многие годы цепь не всегда последовательных событий (этапов ЖЦ), предполагающих необходимость сложных стохастических подходов к созданию методологии управления. В этой связи важен правильный выбор критериев оптимизации, варьируя которые можно вырабатывать наиболее эффективное управленческое решение, учитывающее, помимо технико-экономических, и экологические аспекты.

На текущий момент в строительстве все еще широко применяется метод вариантного проектирования. Данный подход включает рассмотрение нескольких альтернативных вариантов и выбор оптимального на основе заранее определенных критериев. Однако существенным недостатком такого метода служит неучет динамических факторов, изменяющихся в ходе эксплуатации системы. В частности, вариантное проектирование не всегда позволяет учитывать:

- адаптивность системы к изменяющимся условиям окружающей среды;
- степень автоматизации процессов мониторинга и контроля загрязнений;
- пространственные ограничения, влияющие на размещение сенсоров и оборудования.

Помимо того, применяемые долгое время методики принятия решений при выборе технических, технологических, конструктивных вариантов развития строительного проекта дают возможность осуществлять выбор только для одного этапа ЖЦ объекта строительства, как правило, этапа реали-

зации проекта, т.е. строительства. При этом оставляется без внимания, какую эффективность будет демонстрировать принятое решение на всем ЖЦ. Современные требования к качеству строительной продукции могут быть удовлетворены только при реализации системного подхода к инвестиционно-строительному процессу как к управлению ЖЦ объектов строительства на всем его протяжении.

Современные строительные процессы в условиях плотной городской застройки сопровождаются значительными техногенными нагрузками на окружающую среду и требуют повышенного внимания к обеспечению безопасности труда. Для оценки эффективности организационно-технологических решений разработана математическая модель, учитывающая вероятность техногенных рисков и динамику их изменения на основе данных, поступающих из BIM-систем и IoT-устройств.

Разработка модели выбора эффективных решений, направленных на повышение безопасности труда при строительном производстве и экологической безопасности городских территорий, обусловлена необходимостью комплексного подхода к анализу условий труда и экологической ситуации в строительной отрасли. В отличие от существующих методов, модель выбора эффективных решений должна учитывать не только экономические, но и экологические и социальные параметры, интегрируя их в единый критерий оценки.

В качестве примеров различного подхода к принятию управленческих решений можно отметить результаты исследований, изложенные в публикациях отечественных и зарубежных ученых. Так, работы [1–3] развивают известный алгоритм выбора решений на основе сравнительной оценки технико-экономических показателей на этапе строительства объекта.

Авторы трудов [4–9] разработали методики, базирующиеся на применении концепции технологий информационного моделирования в строительстве и позволяющие учитывать в оценке критериев безопасности труда и экологической безопасности рассматриваемые варианты производства строительных процессов.

Публикации [10–14] сфокусированы на изучении влияния различных факторов на интенсивность пылевого загрязнения окружающей среды непосредственно при строительстве зданий и сооружений, транспортировке строительных грузов. При этом большое внимание уделяется анализу негативного влияния частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ выделяемой мелкодисперсной пыли на здоровье человека. Помимо антропогенных рассматриваются и природные факторы в качестве источников пылевого загрязнения.

Краткий анализ приведенных исследований свидетельствует о том, что предлагаемые методики дают возможность осуществлять выбор того или иного управленческого решения для конкретных видов технологических строительных процессов, не позволяя реализовывать системный подход к выбору эффективных решений, направленных на повышение безопасности труда при строительном производстве и экологической безопасности городских территорий на протяжении всего ЖЦ объектов строительства.

В работах [15–17] развита модель, позволяющая осуществлять выбор наиболее эффективных решений не только при производстве строительных работ на этапе реализации инвестиционно-строительного проекта (ИСП), но реализовать системный подход к управлению ЖЦ строительного объекта. Предложенный авторами данных исследований подход интегрируется с технологиями информационного моделирования в строительстве (ТИМ), позволяя, с одной стороны, уже на ранних этапах ЖЦ принимать эффективные решения с учетом технических, технологических, экономических и экологических факторов. С другой стороны, модель дает возможность вырабатывать наиболее эффективные управляющие воздействия на управляемые системы в зависимости от фактических значений возмущающих воздействий и дестабилизирующих факторов на протяжении ЖЦ.

В основе современных методологий управления сложными техническими системами, к которым относятся и городские территории, лежит кибернетический аппарат, предложенный Н. Винером еще в 1948 г. [18]. Данный аппарат универсален, что позволяет применять его для анализа управленческой деятельности в разных предметных областях для принятия управленческих решений. Однако эта универсальность в то же время ставит перед исследователями очень сложные задачи. Применение кибернетического аппарата может вызывать значительные

трудности при изучении комплексных технических и особенно социальных систем, требующих учета множества факторов и нелинейных взаимодействий. Кибернетический подход фокусируется на изучении обратной связи, черных ящиков и производных концептов, таких как управление и коммуникация. Он рассматривает системы абстрактно, вне зависимости от их материальной природы.

Таким образом, для расшифровки «черного ящика», являющегося ядром кибернетического алгоритма, необходимо структурно представить его в виде сложнейшей иерархической системы. Этот аппарат позволит принимать эффективные решения при возможности описания всех взаимосвязей между всеми элементами системы на каждом ее уровне, начиная с самых простых. Следовательно, для реализации управленческой функции необходимо разработать математические модели с корректно определенными критериями оптимальности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье авторы развивают модель, описанную в работах [15–17].

Модель дает возможность выбирать наиболее эффективное решение по управлению ЖЦ объектов строительства. За основу методики выбора принят комплексный критерий, включающий технико-экономическую эффективность рассматриваемых решений, их экологическую безопасность с точки зрения воздействия на окружающую среду и здоровье работников и жителей рассматриваемой городской территории, а также вероятность наступления того или иного события (этапа) ЖЦ:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{C_{\text{пр.уд.ijk}} \cdot \lambda_{ijk}}{P_{ijk}}, \quad (1)$$

где K_{ij} — комплексный критерий, оценивающий эффективность j -го значения параметров i -го технологического решения; m — количество этапов ЖЦ (событий); k — номер этапа ЖЦ объекта строительства (события), возникающего с определяемой в соответствии с методикой [19] вероятностью; $C_{\text{пр.уд.ijk}}$ — приведенные удельные затраты, необходимые для исполнения i -го технологического решения; λ_{ijk} — количественный критерий техногенного воздействия на окружающую среду и человека на всех этапах ЖЦ при исполнении принятого i -го решения.

Эта модель, по сравнению с существующими моделями оценки эффективности строительных решений, обладает рядом преимуществ:

1. Комплексный учет рисков — в отличие от традиционных методов, включающих только экономические и экологические параметры, модель интегрирует технологические и организационные характеристики, влияющие на безопасность труда.

2. Использование BIM и IoT — модель позволяет динамически обновлять параметры оцен-

ки на основе данных с датчиков, что обеспечивает адаптивное управление строительными процессами. При исследовании применяли методику мониторинга качества воздуха на основе интернета вещей на строительных площадках, предложенную в работе [20].

3. Пространственная адаптация — учитываются особенности плотной городской застройки, что особенно важно для мегаполисов с высоким уровнем техногенного загрязнения.

4. Гибкость в условиях неопределенности — возможность корректировать оценку при изменении внешних условий (например, при ухудшении качества воздуха или необходимости использования новых технологий переработки отходов).

Данная модель позволяет повысить точность выбора оптимального решения, однако она не учитывает ряд важных факторов, таких как уровень автоматизации, пространственные ограничения и адаптивность системы.

Для дальнейшего совершенствования оценки эффективности организационно-технологических решений разработана математическая модель, учитывающая вероятность техногенных рисков и динамику их изменения на основе сведений, поступающих из BIM-систем и IoT-устройств. Вводимые в модель факторы учитываются введением в нее коэффициентов автоматизации, пространственных ограничений и адаптивности к условиям эксплуатации. Разработка этой модели обусловлена необходимостью комплексного подхода к анализу условий труда и экологической ситуации в строительной отрасли.

Введение дополнительных факторов позволило более точно моделировать реальные условия эксплуатации системы и повысить ее эффективность на всем ЖЦ. В процессе исследования проводилось тестирование модели и ее сравнительная оценка с предыдущими вариантами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы выбора эффективных решений, направленных на повышение безопасности труда при производстве строительных процессов и экологической безопасности городских территорий, предлагается следующий комплексный критерий:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{C_{\text{пр.уд.ijk}} \cdot \lambda_{ijk} \cdot \Psi_{ijk}}{P_{ijk} \cdot \theta_{ijk} \cdot \gamma_{ijk}}, \quad (2)$$

где Ψ_{ijk} — коэффициент, отражающий влияние пространственных ограничений на безопасность труда (например, работа в условиях плотной застройки, ограниченной видимости, повышенного риска аварийных ситуаций); θ_{ijk} — коэффициент адаптивности технологического решения к изменяющимся условиям окружающей среды (чем выше значение, тем гибче решение к изменению погодных условий,

загрязнению воздуха, нагрузке на инфраструктуру и др.); γ_{ijk} — коэффициент, учитывающий степень автоматизации процессов и уровень цифрового мониторинга через BIM и IoT (более высокие значения соответствуют лучшей управляемости процесса и сниженным рискам).

При этом целевой функцией выбора эффективных решений в соответствии с моделью (2) является минимизация значений K_{ij} , т.е. из всех рассматриваемых вариантов решений выбирается то, для которого значение комплексного критерия минимально ($K_{ij} \rightarrow \min$).

Важный момент применения разработанной модели — корректное установление численных значений введенных в нее факторов.

Стесненность городских условий производства работ Ψ_{ijk} на этапах изысканий, строительства, реконструкции, капитального ремонта, расширения, технического перевооружения учитывали в соответствии с методикой, определяемой приказом Минстроя РФ от 04.08.2020 № 421/пр.

Далее приведены некоторые значения коэффициента пространственных ограничений в зависимости от конкретных условий производства работ (таблица).

Для установления критерия γ_{ijk} (индекс информатизации) в данной работе применяли следующую методику. Первоначально определяли коэффициент автоматизации технологических процессов в строительстве k_a как отношение времени, затрачиваемого на автоматизированные операции t_a , к общему времени выполнения процесса t_{Σ} . С этой целью проводили следующие операции:

1. Проводили хронометраж всех операций технологического процесса с определением его общей продолжительности.
2. Замеряли время, затрачиваемое на автоматизированные операции.
3. Определяли соотношение численных результатов замеров, выполненных по п. 2 к замерам по п. 1.

Очевидно, что при выполнении условия $k_a \rightarrow 1$ технологический процесс является автоматическим; при $k_a \leq 0,5$ процесс мало автоматизирован.

Далее рассчитывали коэффициент k_{Σ} , учитывающий уровень цифрового мониторинга при реализации рассматриваемого ИСП. Данный показатель служит одним из весовых коэффициентов, используемых для расчета итоговой оценки по каждому направлению методики оценки эффективности цифровизации строительной отрасли. Он позволяет оценить степень применения ТИМ в объектах капитального строительства, которые интегрированы в информационную систему управления проектами государственного заказчика в сфере строительства (ИСУП).

Коэффициент цифрового мониторинга в строительстве определяется как отношение объема данных, собранных и обработанных с использова-

Значения коэффициента пространственных ограничений

Values of the spatial constraint coefficient

Условия производства работ Working conditions	Значение ψ_{ijk} Value ψ_{ijk}
<p>Производство работ осуществляется на территории действующего предприятия с наличием в зоне производства работ одного или нескольких из перечисленных ниже факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • разветвленной сети транспортных и инженерных коммуникаций; • стесненных условий для складирования материалов; • действующего технологического оборудования; • движения технологического транспорта <p>The work is carried out on the territory of an existing enterprise, where one or more of the following factors are present in the work area:</p> <ul style="list-style-type: none"> • an extensive network of transport and engineering communications; • limited space for storing materials; • existing technological equipment; • the movement of technological transport 	1,15
<p>Производство работ осуществляется в стесненных условиях населенных пунктов Work is carried out in the cramped conditions of populated areas</p>	1,15
<p>Производство работ по возведению конструктивных элементов встраиваемых помещений внутри строящегося объекта капитального строительства (при возведенных несущих конструктивных элементах), что в соответствии с требованиями технической безопасности приводит к ограничению действий рабочих по производству работ Work on the construction of structural elements of built-in rooms inside the under-construction capital construction facility (with the constructed load-bearing structural elements), which, in accordance with the requirements of technical safety, leads to the restriction of the actions of workers on the production of work</p>	1,20
<p>Производство работ осуществляется в помещениях и иных ограниченных пространствах высотой до 1,8 м Work is carried out in rooms and other confined spaces up to 1.8 m high</p>	1,35

нием цифровых технологий, к общему количеству собранных сведений. Он может принимать значения от 0 до 1, где 0 означает отсутствие использования цифровых технологий, 1 — полное использование цифровых технологий для мониторинга строительства. Численные значения коэффициента определяли в соответствии с «Методикой расчета показателей оценки эффективности формирования цифровой вертикали строительной отрасли субъектами Российской Федерации».

Следует учесть, что коэффициент цифрового мониторинга в строительстве является не только характеристикой уровня цифровизации ИСП, но и субъекта РФ в целом.

На завершающем этапе рассчитывали индекс информатизации как произведение коэффициента автоматизации технологических процессов и коэффициента цифрового мониторинга в строительстве:

$$\gamma_{ijk} = k_a \cdot k_u. \quad (3)$$

Введение в модель коэффициента адаптивности технологического решения к изменяющимся условиям окружающей среды θ_{ijk} обусловлено принятыми в Российской Федерации нормативными документами согласно приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 15.10.2021 № 754/пр «Об утверждении плана адаптации к изменениям климата в сферах строи-

тельства, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения Российской Федерации».

Коэффициент адаптивности технологического решения в строительстве к изменяющимся условиям окружающей среды отражает способность строительного процесса приспосабливаться к этим изменениям. Он включает оценку гибкости, устойчивости и адаптивности технологий и методов строительства к внешним воздействиям и изменениям в окружающей среде. Для определения численных значений коэффициента использовали данные и значения, изложенные в СП 131.13330.2020: СНиП 23-01-99* «Строительная климатология», а также адаптировали методику, предложенную в труде [21], к условиям ЖЦ исследуемых объектов строительства.

При этом применяли следующий алгоритм: проводили анализ факторов природно-климатических воздействий, возникающих на протяжении ЖЦ объекта строительства. Далее выявляли факторы, вызывающие риски ухудшения параметров ЖЦ (увеличение сроков строительства, снижение долговечности и т.д.), выполняли классификацию факторов. Затем анализировали технико-технологические решения, применяемые строительными организациями, характеризующие уровень готовности организации превентивно применять управляющие воздействия на объект управления с целью сниже-

ния негативного влияния природно-климатических явлений как дестабилизирующих факторов.

Численные значения коэффициента адаптивности технологического решения определяли как функцию нескольких факторов:

$$\theta_{ijk} = (T, W, R, S), \quad (4)$$

где T — температурный фактор (учитывает влияние температурных колебаний на строительство, рассчитывается на основе климатологических данных согласно СП 131.13330.2020: СНиП 23-01-99* «Строительная климатология»); W — влажностный фактор (отражает влияние осадков и влажности на строительные процессы); R — устойчивость технологии к внешним нагрузкам (ветровые нагрузки с учетом средних и максимальных скоростей ветра, а также на их направлении согласно СП 131.13330.2020: «СНиП 23-01-99* «Строительная климатология»); S — фактор, учитывающий наличие в рассматриваемых сравниваемых управляющих решениях технологий, позволяющих снизить негативное влияние природно-климатических воздействий. Значения этого коэффициента определяются эффективностью применяемых решений.

На основании полученных результатов коэффициенту адаптивности технологического решения в строительстве к изменяющимся условиям окружающей среды присваивали численные значения. Значения $\theta_{ijk} \rightarrow 1$ соответствуют высокому уровню способности решений по управлению ЖЦ приспосабливаться к различным климатическим и экологическим факторам, таким как ветер, землетрясения, ураганы и другие экстремальные нагрузки.

Следует отметить, что коэффициент адаптивности не может принимать нулевое значение, так как нормативной документацией строительства устанавливаются поправочные коэффициенты, учитывающие факторы природно-климатических воздействий на объект управления (например, увеличение норм времени в зимний период, коэффициенты неравномерности поставок и потребления материально-технических ресурсов, учет динамических и сейсмонагрузок и т.д.).

Для определения коэффициентов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, выражающих количественную оценку интенсивности техногенного воздействия на человека и окружающую среду в процессе ЖЦ при реализации рассматриваемого управляющего решения, была применена следующая методика. В качестве показателя загрязненности и воздействия на здоровье людей в данной работе исследовалась мелкодисперсная пыль.

Пыль в воздухе состоит из частиц разных размеров, и их воздействие на здоровье человека и окружающую среду зависит от размера. Для точной оценки техногенного воздействия предлагается использовать дифференциальное распределение пыли по размерам частиц, выраженное через функцию плотности распределения $D'(\delta)$, где δ — размер частиц. Средне-

взвешенная концентрация пыли определяется как $C = \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} D'(\delta) C(\delta) d\delta$, где $C(\delta)$ — концентрация частиц размера δ , а интегрирование проводится по диапазону 0,5–10 мкм, соответствующему наиболее опасным фракциям (PM₁₀) [22].

Для учета техногенного воздействия пыли в воздухе коэффициент λ_{ijk} определяли через дифференциальное распределение частиц по размерам:

$$\lambda_{ijk} = \lambda_0 \cdot \left(1 + \chi \int_{0,5}^{10} D'(\delta) C(\delta) d\delta \right) \quad (5)$$

где базовое значение λ_0 соответствует минимальному воздействию, а χ регулирует чувствительность к концентрации пыли, определяемую на основе нормативов или эмпирических данных; $D'(\delta)$ — функция плотности распределения пыли; $C(\delta)$ — концентрация частиц размера δ , а интегрирование проводится в диапазоне 0,5–10 мкм (PM₁₀).

В модели K_{ij} коэффициент λ_{ijk} корректирует затраты $C_{пр.уд.ijk}$ с учетом техногенного воздействия пыли, усиливая влияние концентрации вредных веществ на итоговую оценку эффективности.

Диапазон 0,5–10 мкм выбран, так как он охватывает частицы PM₁₀, которые способны проникать в дыхательные пути и оказывать значительное воздействие на здоровье человека, согласно стандартам ВОЗ и национальным нормативам (например, ГОСТ Р 54578–2011).

Для валидации разработанной модели (2) и оценки ее применимости к реальным условиям плотной городской застройки выполнены натурные измерения параметров пылевого загрязнения (PM₁₀ и PM_{2,5}) на двух типовых объектах г. Волгограда в 2024–2025 гг. Представлены результаты замеров при проведении земляных и отделочных работ.

При производстве земляных работ рассматривалась подготовка котлована под многофункциональный комплекс в Центральном районе (площадь 0,8 га, грунт — лёссовидные суглинки, характерные для региона).

Для исследования пылеобразования при производстве отделочных работ были выбраны штукатурные работы в ЖК «Фаренгейт», расположенном на границе Центрального и Ворошиловского районов г. Волгограда на этапе внутренней отделки.

Мониторинг осуществляли с использованием IoT-датчиков качества воздуха (тип: SDS011, точность $\pm 10\%$), интегрированных в локальную BIM-платформу объекта для пространственной привязки данных и расчета интегральных показателей в реальном времени [20]. Информация собиралась с дискретностью 5 мин в течение характерных технологических операций (выемка/погрузка грунта, замес сухой смеси, затирка поверхностей).

Ниже приведена методика валидации разработанной модели выбора эффективных решений.

1. Расчет коэффициента техногенного воздействия (λ_{ijk}) для Волгограда, отражающего пылевое

воздействие (5). Экспериментальные данные позволили определить функцию плотности распределения пыли $D'(\delta)$ и концентрации $C'(\delta)$ для рассматриваемых строительных процессов.

Для земляных работ $D'(\delta)$ показала бимодальное распределение с пиками в диапазонах 2,5–4 мкм (35 %) и 8–10 мкм (45 %). Средневзвешенная концентрация C в рабочей зоне составила 1480 мкг/м³ (PM₁₀), 520 мкг/м³ (PM_{2,5}). Приняли $\lambda_0 = 1$ (базовое воздействие), $\chi = 0,002$ (согласно ГОСТ Р 54578–2011 и данным [11]). В результате расчета получено значение $\lambda_{ijk} = 3,96$.

Для штукатурных работ $D'(\delta)$ — выраженный пик в диапазоне 0,5–2,5 мкм (75 % частиц PM_{2,5}); средневзвешенная концентрация C в рабочей зоне 880 мкг/м³ (PM₁₀), 650 мкг/м³ (PM_{2,5}). При этом подстановка значений измерений в расчетную модель позволяет получить следующий результат: $\lambda_{ijk} = 2,76$.

2. Корректировка коэффициентов модели на основе локальных условий.

Коэффициент пространственных ограничений ψ_{ijk} определяли согласно таблице.

Индекс информатизации γ_{ijk} для земляных работ при невысоком уровне автоматизации $k_a \approx 0,3$ (управление техникой оператором). Коэффициент цифрового мониторинга k_u при использовании 5 IoT-датчиков принимали равным 0,6. Соответственно, $\psi_{ijk} = 0,18$.

Для штукатурных работ уровень автоматизации более низок в связи с высокой долей ручных работ $k_a \approx 0,05$. Мониторинг включал 2 датчика на этаж $k_u \approx 0,4$. Таким образом, $\psi_{ijk} = 0,02$.

При определении коэффициента адаптивности θ_{ijk} при земляных работах учитывались сезонные факторы Волгограда (жаркое лето, ветры). Применяли периодическое орошение (адаптивность средняя). На основе выражения (4) и данных СП 131.13330.2020 $\theta_{ijk} = 0,65$.

При производстве штукатурных работ внутри здания защита от внешней среды на высоком уровне. Но при естественной вентиляции (адаптивность к внутренней запыленности низкая) $\theta_{ijk} = 0,45$.

3. Применение комплексной модели (2) для определения эффективности технологий пылеподавления. За базовый сценарий принималось производство работ без дополнительных мер пылеподавления на этапе строительства. Приведенные удельные затраты принимали в соответствии со сметной документацией объектов (усреднено). В результате расчетов получены следующие значения K_{ij} : 46 810 для земляных работ и 312 800 для штукатурных.

При производстве земляных работ с применением системы туманообразования значения C сократились до 550 мкг/м³ (PM₁₀), что позволило снизить λ_{ijk} до 2,1. Кроме того, незначительно увеличилось значение χ_{ijk} до 0,2 вследствие дополнительного применения датчика влажности. Значение θ_{ijk} возросло до 0,80 (лучшая адаптивность к пыли). В результате подстановки полученных значений в выражение (2)

$K_{ijk} = 18\ 867$, что в 2,48 раза ниже, чем для базового сценария.

Для штукатурных работ, проводимых с применением локальных вытяжных установок с НЕРА-фильтром (применяли фильтровентиляционную установку ФВУ-1РК), зафиксировали снижение C до 220 мкг/м³ (PM₁₀). При этом $\lambda_{ijk} = 1,44$. Значение χ_{ijk} возросло до 0,1 (автоматизация включения вытяжки), а θ_{ijk} — до 0,7. После подстановки всех значений в выражение (2) получили $K_{ij} = 22\ 719$. Таким образом, эффективность принятого решения с учетом критерия экологической безопасности возросла в 1,4 раза.

4. Валидацию модели на примере г. Волгограда выполнили по следующим критериям:

- точность прогноза — сравнение расчетных концентраций пыли с данными IoT-мониторинга показало расхождение менее чем на 15 % для земляных и 12 % для штукатурных работ после калибровки χ . Основной вклад в погрешность вносит изменчивость ветровой нагрузки (R в θ_{ijk}), характерная для Волгограда;

- чувствительность модели. Наибольшее влияние на K_{ij} в условиях Волгограда оказывают: λ_{ijk} (уменьшение на 40 % снижает K_{ij} на 35 %), χ_{ijk} (повышение уровня мониторинга/автоматизации на 0,1 дает снижение K_{ij} на 8–12 %), ψ_{ijk} (значения 1,15–1,20 существенно увеличивают итоговый критерий, подчеркивая важность выбора технологий для плотной застройки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная в результате проведенных исследований модель обладает следующими преимуществами по сравнению с существующими:

1. Комплексный учет рисков — в отличие от традиционных методов, включающих только экономические и экологические параметры, модель интегрирует технологические и организационные характеристики, влияющие на рациональность использования и экологическую безопасность городских территорий.

2. Использование BIM и IoT — модель позволяет динамически обновлять параметры оценки на основе данных с датчиков, что обеспечивает адаптивное управление ЖЦ объекта строительства.

3. Пространственная адаптация — учитываются особенности плотной городской застройки, что особенно важно для мегаполисов с высоким уровнем техногенного загрязнения.

4. Гибкость в условиях неопределенности — коэффициенты ψ_{ijk} и θ_{ijk} дают возможность корректировать оценку при изменении внешних условий (например, при ухудшении качества воздуха или необходимости использования новых технологий переработки отходов).

5. Экспериментальная апробация на объектах г. Волгограда (земляные и штукатурные работы) по-

казала, что модель адекватно прогнозирует пылевое воздействие λ_{ijk} с погрешностью менее 15 %, а внедрение мер пылеподавления снижает комплексный критерий K_{ij} в 1,4–2,48 раза.

Сравнение расчетных значений с данными BIM-моделирования и IoT-мониторинга подтверждает высокую точность модели.

Применение на строительных площадках в условиях плотной застройки, где пространственные ограничения играют ключевую роль в безопасности труда.

Соответствие существующим нормативным требованиям по охране труда и экологии, что делает

модель применимой в реальных строительных проектах.

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что предложенная математическая модель в рамках BIM и IoT-платформ обеспечивает комплексную оценку эффективности организационно-технологических решений, направленных на повышение безопасности труда при производстве строительных процессов на различных этапах ЖЦ объектов строительства и экологической безопасности городских территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов П.П., Сидоров А.Н. Методика оценки экологических рисков при организации строительных работ // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 2. 105–112.
2. Кабанов В.Н. Технический критерий выбора экскаватора для разработки котлована // Инженерный вестник Дона. 2021. № 1 (73). С. 298–306. EDN NVCAUQ.
3. Голубова О.С. Показатели экономической эффективности строительных работ // Экономическая наука сегодня. 2018. № 8. С. 130–138. EDN GUFYPZ.
4. Santos Júnior J.E., Galhardo C.X., Santos V.M.L. Innovations in the Civil Construction Sector Provided by Information Technologies // Revista Gestão Inovação e Tecnologias. 2019. Vol. 9. Issue 4. DOI: 10.7198/geintec.v9i4.1382
5. Jin R., Zhong B., Ma L., Hashemi A., Ding L. Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle // Automation in Construction. 2019. Vol. 106. P. 102861. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102861
6. Ma W., Yin Y., Yang G., Li Q., Lu B. Comprehensive Performance Evaluation Method of Green Materials for Coastal Buildings Based on BIM // Journal of Coastal Research. 2019. Vol. 93. Issue sp1. P. 304. DOI: 10.2112/SI93-040.1
7. Okakpu A., Hoseini A.G., Tookey J., Haar J., Ghaffarianhoseini A. Exploring the environmental influence on BIM adoption for refurbishment project using structural equation modelling // Architectural Engineering and Design Management. 2020. Vol. 16. Issue 1. Pp. 41–57. DOI: 10.1080/17452007.2019.1617671
8. Shafique M., Rafiq M. An Overview of Construction Occupational Accidents in Hong Kong: A Recent Trend and Future Perspectives // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Issue 10. P. 2069. DOI: 10.3390/app9102069
9. Shuang D., Heng L., Skitmore M., Qin Y. An experimental study of intrusion behaviors on construction sites: The role of age and gender // Safety Science. 2019. Vol. 115. Pp. 425–434. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.035
10. Филиппов А.А., Сулейманов И.Ф., Арсланов М.А. Теоретические основы комплексного подхода к оценке экологической опасности автотранспорта на участке урбанизированной территории // Интеллектуальные инновации. Инвестиции. 2019. № 1. С. 97–103. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-97. EDN YZKKWD.
11. Калюжина Е.А., Сергина Н.М., Елфинов К.А., Стреляева А.Б. Исследование пылевыделений в окружающую атмосферу и в атмосферу рабочей зоны при производстве ремонтно-строительных работ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 371–378. EDN CCPQTW.
12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Dust dispersion patterns during construction processes: A multi-process simulation study // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 8451.
13. Глинянова И.Ю., Асанова Н.В. Исследование количества мелкодисперсной пыли и ее химического состава в жилой зоне населенных пунктов с позиции экологической безопасности предприятий строительной индустрии // Строительство и технологическая безопасность. 2021. № 23 (75). С. 89–100. EDN YINDOJ.
14. Brown J., Smith K. Environmental Impact Assessment for Urban Construction // Journal of Sustainable Engineering. 2021. Vol. 45. Issue 6. Pp. 230–245.
15. Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Оганесян О.В. Выбор оптимальных технологических решений в условиях плотной городской застройки на основе BIM-технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 329–335. EDN KYLMXS.
16. Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Азарова М.Д. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха // Вестник МГСУ.

2024. Т. 19. № 3. С. 456–468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468. EDN LRYEEO.

17. Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Елфимов К.А. Методология принятия оптимальных решений по управлению жизненным циклом объекта капитального строительства с учетом критерия пылевого загрязнения атмосферного воздуха // Экономика строительства и природопользования. 2023. № 3 (88). С. 48–54. EDN WVQQUR.

18. Wiener N. Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine. The MIT Press, 1948. 231 p.

19. Азаров В.Н., Бурлаченко А.О. Организация строительного производства с учетом экологической безопасности принимаемых решений // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 1 (41). С. 76–83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT.

Поступила в редакцию 22 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 24 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 15 сентября 2025 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Валерий Николаевич Азаров** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства, советник РААСН; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 148320, Scopus: 7004170297, ResearcherID: N-2168-2018, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Олег Васильевич Бурлаченко — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства, заместитель директора Института архитектуры и строительства по научной работе; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 282520, Scopus: 41761032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Елена Владимировна Сысоева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Институт архитектуры и градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5703-9029, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Александр Олегович Бурлаченко — преподаватель кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: ННМ-5981-2022, ORCID: 0000-0003-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ivanov P.P., Sidorov A.N. Methodology of environmental risk assessment in the organization of construction works. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2019; 2:105-112. (rus.).

2. Kabanov V.N. Technical criteria for choosing an excavator for pit development. *Engineering journal of Don*. 2021; 1(73):298-306. EDN NVCAUQ. (rus.).

3. Holubava V.S. Indicators of economic effectiveness construction works. *Economics of this day*. 2018; 8:130-138. EDN GUFYPZ. (rus.).

20. Zhang L., Wang Y. Application of IoT-based Air Quality Monitoring in Construction Sites // *Environmental Engineering Research*. 2022. Vol. 38. Issue 3. Pp. 78–92.

21. Акентьева Е.М., Ключева М.В. Адаптация строительной отрасли экономики к изменению климата на основе анализа погодноклиматических рисков (на примере Псковской, Смоленской и Брянской областей) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2018. № 590. С. 103–117. EDN VPJDUG.

22. Манжилевская С.Е. Экологические риски на строительной площадке при точечной застройке в городе // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 6. С. 35–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-35-41. EDN JPDUYP.

4. Santos Júnior J.E., Galhardo C.X., Santos V.M.L. Innovations in the Civil Construction Sector Provided by Information Technologies. *Revista Gestão Inovação e Tecnologias*. 2019; 9(4). DOI: 10.7198/geintec.v9i4.1382

5. Jin R., Zhong B., Ma L., Hashemi A., Ding L. Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle. *Automation in Construction*. 2019; 106:102861. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102861

6. Ma W., Yin Y., Yang G., Li Q., Lu B. Comprehensive Performance Evaluation Method of Green Materi-

als for Coastal Buildings Based on BIM. *Journal of Coastal Research*. 2019; 93(sp1):304. DOI: 10.2112/SI93-040.1

7. Okakpu A., Hoseini A.G., Tookey J., Haar J., Ghaffarianhoseini A. Exploring the environmental influence on BIM adoption for refurbishment project using structural equation modelling. *Architectural Engineering and Design Management*. 2020; 16(1):41-57. DOI: 10.1080/17452007.2019.1617671

8. Shafique M., Rafiq M. An Overview of Construction Occupational Accidents in Hong Kong: A Recent Trend and Future Perspectives. *Applied Sciences*. 2019; 9(10):2069. DOI: 10.3390/app9102069

9. Shuang D., Heng L., Skitmore M., Qin Y. An experimental study of intrusion behaviors on construction sites: The role of age and gender. *Safety Science*. 2019; 115:425-434. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.035

10. Filippov A.A., Suleymanov I.F., Arslanov M.A. Theoretical foundations of an integrated approach to the assessment of the ecological hazard of vehicle in the urbanized area. *Intellect. Innovations. Investments*. 2019; 1:97-103. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-97. EDN YZKKWD. (rus.).

11. Kalyuzhina E.A., Sergina N.M., Elfimov K.A., Strelyaeva A.B. Research of dust release in the surrounding atmosphere and into the atmosphere of the working area in production of repair and construction works. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2020; 4(81):371-378. EDN CCPQTW. (rus.).

12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Dust dispersion patterns during construction processes: A multi-process simulation study. *Sustainability*. 2021; 13:8451.

13. Glinyanova I.Yu., Asanova N.V. Research of the amount of fine dust and its chemical composition in the residential area of inland areas from the position of environmental safety of the construction industry. *Construction and Industrial Safety*. 2021; 23(75):89-100. EDN YINDOJ. (rus.).

14. Brown J., Smith K. Environmental Impact Assessment for Urban Construction. *Journal of Sustainable Engineering*. 2021; 45(6):230-245.

15. Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Oganesyan O.V. The selection of optimal technological solu-

tions in conditions of dense urban development based on BIM-technologies. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2020; 1(78):329-335. EDN KYLMXS. (rus.).

16. Azarov V.N., Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Azarova M.D. Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(3):456-468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468. EDN LRYEEO. (rus.).

17. Azarov V.N., Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Elfimov K.A. Methodology for making optimal decisions on managing the life cycle of a capital construction object, taking into account the criterion of atmospheric air dust pollution. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2023; 3(88):48-54. EDN WVQQR. (rus.).

18. Wiener N. *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press, 1948; 231.

19. Azarov V.N., Burlachenko A.O. The construction production organization taking into account the ecological safety of the decisions taken. *Biospheric Compatibility: Man, Region, Technology*. 2023; 1(41):76-83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT. (rus.).

20. Zhang L., Wang Y. Application of IoT-based Air Quality Monitoring in Construction Sites. *Environmental Engineering Research*. 2022; 38(3):78-92.

21. Akentyeva E.M., Klueva M.V. Adaptation of construction sector to climate change based on the analysis of weather and climate risks (the case of Pskov, Smolensk and Bryansk regions). *Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2018; 590:103-117. EDN VPJDUG. (rus.).

22. Manzhilevskaya S.E. Environmental risks at a construction site during infill development in the city. *Ecology and Industry of Russia*. 2024; 28(6):35-41. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-35-41. EDN JPDUIP. (rus.).

Received August 22, 2025.

Adopted in revised form on August 24, 2025.

Approved for publication on September 15, 2025.

B I O N O T E S: **Valerij N. Azarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Economy, Institute of Architecture and Construction, Adviser to the RAASN; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 148320, Scopus: 7004170297, ResearcherID: N-2168-2018, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Oleg V. Burlachenko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production Technology, Deputy Director of the Institute of Architecture and Construction for Research; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 282520, Scopus: 41761032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Elena V. Sy'soeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics, Institute of Architecture and Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 5703-9029, Scopus: 57192373360, ORCID: 0000-0001-7250-3190; SysoevaEV@mgsu.ru;

Alexander O. Burlachenko — lecturer at the Department of Engineering Graphics, Standardization and Metrology, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: HHM-5981-2022, ORCID: 0000-0003-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com.

Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.