

Современные информационные технологии как инструмент повышения пожарной безопасности зданий

Алла Александровна Гусарова ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является теоретическое исследование в виде обзора и анализа текущих ограничений и возможностей применения современных информационных технологий в сфере строительной отрасли для повышения уровня пожарной безопасности объектов капитального строительства.

Задачи исследования:

- обзор и анализ зарубежных и отечественных исследований в области применения современных информационных технологий в сфере строительства и пожарной инженерии;
- выявление текущих проблем и возможностей применения рассматриваемых информационных технологий для задач пожарной безопасности;
- описание возможного алгоритма реализации сценария применения BIM для целей оценки проектных решений на предмет пожарной безопасности.

Актуальность настоящей темы обусловлена малым опытом применения рассматриваемых в статье развивающихся информационных технологий в строительной отрасли в России для решения задач пожарной инженерии.

Состояние цифровизации сегодня. Выполнен обзор исследования американской организации «Общество инженеров пожарной защиты», в котором рассмотрены проблемы и перспективы развития сферы пожарной безопасности с учетом текущей всеобщей цифровизации. Описаны современные технологии, применяемые в сфере строительства и эксплуатации, которые могут быть использованы для решения задач пожарной безопасности. Приведены варианты применения технологии информационного моделирования здания, «цифрового двойника» объекта капитального строительства и Интернета вещей для решения задач пожарной безопасности.

Выводы. Результаты исследования позволили определить текущие проблемы и перспективы применения современных информационных технологий для повышения безопасности объектов капитального строительства. Выделенная проблематика может быть использована для развития теоретических и практических исследований по рассмотренной тематике.

Ключевые слова: информационное моделирование здания; цифровой двойник; искусственный интеллект; Интернет вещей; трехмерная модель

Для цитирования: Гусарова А.А. Современные информационные технологии как инструмент повышения пожарной безопасности зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 36–46. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.36-46.

✉ Гусарова Алла Александровна, e-mail: 2609gaa@gmail.com

Modern information technologies as a tool to improve fire safety of buildings

Alla A. Gusarova ✉

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

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is a theoretical study in the form of review and analysis of current limitations and possibilities of application of modern information technologies in the sphere of construction industry to increase the level of fire safety of capital construction objects.

Objectives of the study:

- review and analysis of foreign and domestic research in the field of application of modern information technologies in the field of construction and fire engineering;
- identification of current issues and possibilities of application the information technologies under consideration for fire safety tasks;

- description of a possible algorithm of realization of the scenario of BIM application for the purposes of assessment of design solutions for fire safety.

The relevance of the topic under consideration is due to the limited experience of application of the developing information technologies considered in the article in the construction industry in Russia to solve fire engineering problems.

Current state of digitalization. The review of the study of the American organization "Society of Fire Protection Engineers", which examined the issues and prospects of development of the sphere of fire safety, taking into account the current universal digitalization, is carried out. Modern technologies used in the field of construction and operation, which can be used to solve fire safety problems, are described. The variants of application of building information modelling technology, a "digital twin" of the capital construction object and the Internet of Things to solve fire safety problems are presented.

Conclusions. The results of the study made it possible to identify the current issues and prospects of application of modern information technologies to improve the safety of capital construction objects. The identified issues can be used to develop theoretical and practical research on the considered subject.

Keywords: building information modelling; digital twin; artificial intelligence; Internet of Things; three-dimensional model

For citation: Gusarova A.A. Modern information technologies as a tool to improve fire safety of buildings. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):36-46. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.36-46 (rus).

✉ Alla Aleksandrovna Gusarova, e-mail: 2609gaa@gmail.com

Введение

Развитие современных технологий обеспечивает цифровизацию строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства. В данной статье рассматривается возможность применения технологий информационного моделирования, «цифрового двойника» объекта капитального строительства, Интернета вещей (англ. internet of things, IoT) и искусственного интеллекта для задач пожарной инженерии. В результате цифровизации строительной отрасли появляется большой объем данных об объекте капитального строительства на разных этапах его жизненного цикла. Эти данные могут быть использованы в процессе принятия решений различных задач, связанных с управлением проекта.

Цель статьи состоит в определении текущих возможностей и проблем при применении рассматриваемых современных отраслевых информационных технологий для решения задач пожарной безопасности. Для достижения поставленной цели был проведен обзор и анализ текущих исследований и практик применения рассматриваемых технологий в области пожарной инженерии.

Исследование является важным в связи с тем, что рассматриваемые информационные технологии позволяют получать большой объем актуальных данных об объекте строительства, применение которых может повысить качество принятия решений в процессе управления объектом. Однако существует потребность в определении необходимого объема таких данных, способах и вариантах их использования. Важно понять, качество решения каких задач может быть улучшено за счет получения более актуальной, достоверной и полной информации об объекте.

Также на данный момент не существует общепринятого подхода по согласованному применению

рассматриваемых информационных технологий для задач, возникающих в процессе управление проектом, в том числе для задач обеспечения безопасности объекта. Это связано с тем, что:

- рассматриваемые информационные технологии на данный момент развиваются и имеют небольшое практическое применение;
- множество участников, задействованных на разных этапах жизненного цикла объекта, часто ведут свою деятельность в специализированных системах, которые не имеют прямой интеграции с системами других участников проекта, что влияет на качество взаимодействия и обмена информацией внутри проекта. Это может касаться в том числе и смежных специалистов.

Состояние цифровизации сегодня

В 2022 г. рабочая группа по цифровизации, искусственному интеллекту и кибербезопасности (DAIC) американского фонда Общества инженеров пожарной защиты (SFPE) провела исследование [1], связанное с развитием цифровизации в строительстве, в ходе которого выбраны основные актуальные темы для изучения:

- управление данными о пожаре;
- умное моделирование пожара;
- цифровое проектирование, проверка, эксплуатация и техническое обслуживание систем противопожарной безопасности;
- цифровое пожаротушение и эвакуация.

Исследование рассматривало и этические вопросы, которые затрагивают каждую из перечисленных тем. На рис. 1 продемонстрирована взаимосвязь рассматриваемых тем.

Управление пожарными данными связано с тем, что эти данные можно архивировать и управлять ими до и после возникновения пожара с целью



Рис. 1. Актуальные темы исследования
Fig. 1. Current research topics

выбора наиболее правильных решений на всех этапах жизненного цикла здания для предотвращения пожаров и получения отчетов о происшествиях. На основе указанных данных может быть реализовано моделирование процессов и обучение систем искусственного интеллекта (ИИ). Развитие цифровых технологий, IoT и «цифровых двойников» позволит выполнять раннее прогнозирование разных сценариев пожаров и принимать правильные

решения в борьбе с пожарами и для спасения людей. Этические вопросы, объединяющие все перечисленные аспекты исследований, связаны с профессиональным развитием специалистов, безопасностью личных данных, получаемых с IoT-устройств, и формированием требований к развитию искусственного интеллекта.

Основные проблемы, выявленные по итогам исследования [1], представлены в таблице.

В России в процессы строительной отрасли активно внедряются технологии информационного моделирования (ТИМ). Информационное моделирование позволяет получать цифровую информацию о модели объекта строительства (ЦИМ, английский аналог — BIM). ЦИМ представляет собой трехмерную модель объекта, состоящую из отдельных взаимосвязанных компонентов и содержащую информацию о характеристиках компонентов объекта в виде атрибутивного состава. ЦИМ здания развивается в соответствии с жизненным циклом самого здания: проектно-изыскательские работы — строительство — эксплуатация — снос. В процессе развития проекта модель наполняется актуальными данными, которые могут использоваться для автоматического анализа для различных целей.

Актуальные проблемы
Current issues

Проблема Issue	Описание Specification
Отсутствие эффективной системы оценки моделей пожара на основе ИИ Lack of an effective system for assessing fire models based on AI	Отсутствие системы, показателей оценки и признанных, надежных общепринятых стандартных наборов данных для обучения ИИ и моделирования сценариев пожара является на данный момент препятствием для развития в этой области. В работе [2] рассматривается пример системы индексов оценки здания по уровню потенциального риска, допустимому уровню риска и уровню защищенности The lack of systems, evaluation metrics and recognized, reliable, generally accepted standard datasets for AI training and fire scenario modelling is currently an obstacle to development in this area. In [2], an example of a system of indices for assessing a building according to the level of potential risk, acceptable level of risk and protection level is discussed
Недостаточное исследование применения информационного моделирования зданий (ВИМ) в сфере пожарной безопасности Insufficient research on the application of building information modelling (BIM) in the fire safety sector	Проблемы применения ВИМ, которые требуют изучения, связаны с разработкой системы противопожарной защиты на основе ВИМ и цифровых двойников, получением данных из ВИМ для моделирования и анализа пожара, конфиденциальностью и безопасностью данных при передаче моделей ВИМ третьим лицам. Таким образом, отсутствует систематическое понимание применения ВИМ для моделирования сценариев пожара The BIM application issues that need to be studied are related to the development of BIM-based fire protection system and digital twins, the acquisition of data from BIM for fire modelling and analysis, data privacy and security when BIM models are shared with third parties. Thus, there is a lack of systematic understanding of the application of BIM for modelling fire scenarios
Цифровая безопасность Digital security	Цифровые системы имеют потенциальные уязвимости безопасности, которые могут быть использованы злоумышленниками. Разработка систем пожарной безопасности должна учитывать требования кибербезопасности. Для этого специалисты и инженеры должны иметь соответствующие знания Digital systems have potential security vulnerabilities that can be exploited by attackers. The development of fire safety systems must take cyber security requirements into account. For this purpose, specialists and engineers must have the appropriate knowledge

Проблема Issue	Описание Specification
Высокие затраты на применение новых информационных технологий High costs for the application of new information technologies	Высокие затраты на установку и обслуживание цифровых систем являются ограничивающим фактором для широкого применения этих дорогостоящих систем The high cost of installing and maintaining digital systems is a limiting factor for widespread use of these expensive systems
Проблемы, связанные с управлением базами данных в сфере пожарной безопасности Issues related to database management in the sphere of fire safety	Характерными проблемами для управления базами данных могут быть такие как: отсутствие стандартного формата для обмена данными экспериментов, моделирования или реальных пожаров. Это препятствует созданию общей большой базы данных о пожарах Typical issues for database management may include: the lack of a standard format for exchanging data from experiments, modelling or real fires. This prevents the creation of a common large fire database
Недоверие к применению ИИ Distrust in the use of AI	Внедрение интеллектуального моделирования пожаров может вызывать недоверие академического сообщества к результатам использования искусственного интеллекта. Это недоверие может быть связано с природой черного ящика или интерпретируемостью моделей ИИ. Такая проблема затронута в работе [3] The implementation of intelligent fire modelling may cause mistrust in the academic community in the results of artificial intelligence. This mistrust may be related to the black box nature or the interpretability of AI models. This issue is raised in the work [3]
Проблема междисциплинарной интеграции Issue of interdisciplinary integration	Цифровизация в областях проектирования, проверки, эксплуатации и технического обслуживания объектов предполагает междисциплинарное сотрудничество и совместимость на нескольких платформах. На данный момент выделены разные технологии (IoT, BIM) и системы (противопожарной защиты, управления зданием), которые имеют собственные программные инструменты. Отсутствие общей платформы, позволяющей обеспечивать передачу данных между разными дисциплинами, является барьером в развитии рассматриваемой области. Такая проблема затронута в работе [4], где рассматривается применение общеобменного формата IFC Digitalization in the areas of design, inspection, operation and maintenance of facilities involves interdisciplinary cooperation and interoperability on several platforms. At the moment, different technologies (IoT, BIM) and systems (fire protection, building management) are identified, which have their own software tools. The lack of a common platform that allows data transfer between different disciplines is a barrier to the development of the area under consideration. This issue is raised in [4], where the application of the general exchange format IFC is considered
Отсутствие понимания эффективности и целей цифровых систем пожаротушения Lack of understanding of the effectiveness and purpose of digital fire suppression systems	Отсутствие достаточного опыта применения цифровых систем пожаротушения приводит к непониманию эффективности, стоимости и потенциальных экономических выгод таких систем, что является барьером для привлечения инвестиций. Также на данный момент нет четкой и конкретной цели применения цифровых систем пожаротушения и эвакуации, что замедляет их развитие, так как цель определяет путь развития The lack of sufficient experience in the application of digital fire extinguishing systems leads to a lack of understanding of the effectiveness, cost and potential economic benefits of such systems, which is a barrier to attracting investment. Also, at the moment, there is no clear and specific goal for the application of digital fire extinguishing and evacuation systems, which slows down their development, as the goal determines the path of development

На сегодняшний момент существуют разные направления исследования в части использования данных ЦИМ зданий, например, в части пожарной безопасности можно выделить следующие направления (рис. 2):

- оценка пожарной безопасности на площадке строительства;
- моделирование пожара;
- моделирование эвакуации;
- оценка пожарной безопасности объекта строительства на соответствие требований пожарной безопасности;
- оценка пожарных рисков на объекте строительства;

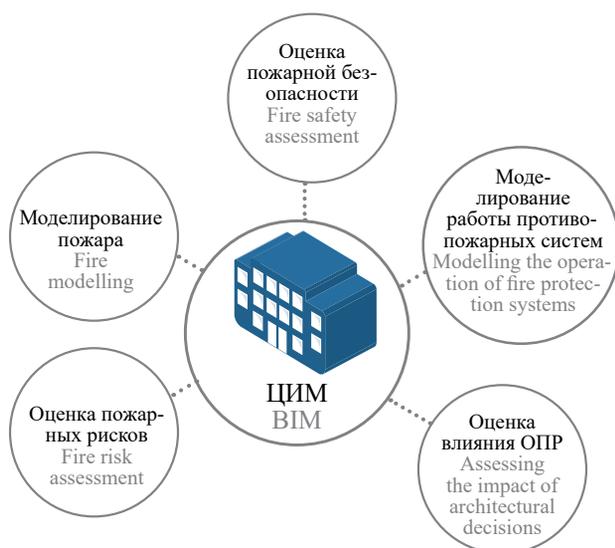


Рис. 2. ЦИМ для решения задач в области пожарной безопасности

Fig. 2. BIM for solving fire safety issues

- анализ распространения продуктов горения;
- оценка влияния объемно-планировочных решений (ОПР) на пожарную безопасность объекта;
- моделирование режимов работы систем вентиляции противопожарного назначения;
- моделирование систем автоматической противопожарной сигнализации и систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре и др.

Системы обнаружения пожара все больше интегрируются с системами автоматизации и управления зданиями для обеспечения полноценной защиты здания от различных чрезвычайных ситуаций. Применение взаимосвязанных IoT-устройств позволяет настроить более гибкие алгоритмы для срабатывания систем защиты объекта и снизить вероятность ложного срабатывания. Данные, полученные с помощью IoT, могут быть полезны для служб экстренного реагирования. Например, информация о местонахождении людей и местах пожара может быть актуальна для пожарных подразделений в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Также могут отслеживаться данные о соблюдении требований пожарной безопасности на объекте с целью контроля состояния здания.

Исследование задачи определения фактического местоположения людей на объекте. В работе [5] рассматривается метод определения численности и местоположения посетителей здания при их эвакуации из здания по Wi-Fi, который позволяет отслеживать мобильные устройства. В работе представлена математическая модель и алгоритм рассматриваемого метода, а также программный инструмент, позволяющий его реализовать.

Для определения локации мобильного устройства в зданиях коридорного типа была приме-

нена модель для вычисления потерь радиосигнала ITU-R P.1238.8. В работе [5] представлена потоковая модель и алгоритм для перемещения динамических потоков с учетом свойств модели. Разработанная программа в исследовании позволяет сканировать Wi-Fi сетей, моделировать процесс эвакуации и вычислять местоположение мобильного телефона.

В публикации [6] рассматривается система пожарной эвакуации на основе информационного моделирования зданий (BIM) и дополненной реальности (AR), которая может обеспечить доступ в режиме реального времени к такой информации, как текущее местоположение пользователя, выход, расстояние кратчайшего маршрута от текущего местоположения до пункта назначения, а также виртуальная зеленая линия, голос и направление стрелки для руководства по эвакуации. В результате исследования для проверки были произведены дополнительные замеры расстояний от маркеров до выходов лазерным дальномером. По результатам проверки процентная разница по указанным расстояниям, рассчитанным разработанной системой и лазерным дальномером, составляет менее 2,2 %. Следовательно, система эффективно предоставляет требуемую информацию. Однако у разработанной системы есть текущие ограничения, связанные с тем, что пользователю нужно отсканировать изображение с маркером, размещенное на стенах, чтобы получить информацию в реальном времени. В будущем в систему планируется добавить больше информации с датчиком, чтобы алгоритм мог советовать безопасный вариант эвакуации.

Исследование задачи получения актуальных данных об объекте для управления процессами на объекте. В работах [7, 8] рассматриваются примеры и преимущества применения BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла объекта для обеспечения его безопасности за счет повышения качества проектной, строительной документации, исполнительной и эксплуатационной документации проекта по архитектурным и конструктивным решениям и по системам противопожарной защиты. В том числе рассматриваются варианты интеграции BIM с системами управления объектом для визуализации актуальных данных об объекте, мониторинга и расчета воздействий на объект.

Каждый элемент трехмерной ЦИМ содержит информацию о себе в виде атрибутов и их значений. Например, коридор замоделирован элементом «Помещение» или «Пространство», который содержит атрибуты «Наименование» со значением «Коридор», «Высота» со значением «2 м» и так далее. В процессе проверки модели можно автоматизированно проверять информацию атрибутов во всех элементах модели по заданным правилам.

Таким образом можно проверить все элементы модели архитектуры на соответствие требованиям пожарной безопасности. Например, можно выбрать все элементы с именем «Коридор» и проверить в них атрибут «Ширина» по условию, что значение $\llbracket > 1,8 \text{ м} \rrbracket$.

В докладе [9] автором ранее были рассмотрены примеры применения искусственного интеллекта совместно с BIM в сфере проектирования объемно-планировочных решений. Так как модели ИИ являются обучаемыми и настраиваемыми, т.е. возможно добавлять требования в части безопасности для их учета в проверках проектных решений при проектировании объекта.

На данный момент применение информационного моделирования внедряется на этапе строительства, что позволяет получать актуальные данные о процессе строительства и осуществлять строительный контроль на основе трехмерной информационной модели.

В работе [10] рассматривается обеспечение пожарной безопасности в высотных зданиях и системы управления пожаром на основе GIS и BIM.

В публикации [11] рассматривается технология BIM как драйвер развития цифровизации управления объектами и варианты интеграции всех систем современных технологий в процесс управления объектом.

В статье [12] описываются варианты применения BIM при выполнении спасательных и восстановительных работ во время и после чрезвычайных ситуаций (например, мониторинг воздействия природных факторов на объект, оценка вариантов местонахождения людей, оценка повреждений конструкций объекта).

Исследование задачи моделирования режима эвакуации людей. В работах [13–17] рассматриваются различные варианты использования BIM-технологий и «цифрового двойника» для конкретных задач безопасности в части мониторинга актуального состояния объекта, режимов эксплуатации, моделирования процессов и сценариев [18–22], возможных при эксплуатации объекта и для создания интеллектуальных систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре.

Работы содержат описание моделирования процесса эвакуации людей, расчетов времени эвакуации в зависимости от разных параметров движения людей, параметров конструкций и противопожарных систем как сегментов «умного дома».

В рамках данной статьи в общем случае сценарий применения BIM для целей оценки проектных решений на основе моделирования пожара по шагам представлен на рис. 3. Для реализации данного сценария нужно сформировать BIM-модель с пол-

ной и точной информацией о компонентах модели (геометрические данные, свойства и характеристики элементов и др). Для моделирования пожара необходимо:

- определить программные инструменты, в которых будет реализована симуляция пожара (распространения огня и дыма внутри здания и т.п.);
- определить данные BIM-модели, необходимые для симуляции пожара, и способы их интеграции в модель пожара.

По результатам симуляции пожара возможно определить путь распространения пожара внутри здания и наиболее незащищенные места в здании. Также возможно реализовать оценку эвакуации с учетом оптимальных путей эвакуации и выходов из здания. В результате симуляции и полученных данных можно выполнить проверку проектных решений по зданию на соответствие российским нормативам и стандартам безопасности, таким как СП 2.13130.2009¹. В случае неудовлетворительных результатов симуляции необходимо провести калибровку модели пожара и BIM-модели. При необходимости на основе полученных моделей симуляции и результатов можно провести физические эксперименты и тестирование, по результатам которых может быть выявлена потребность в корректировке моделей симуляции. По итогам результатов симуляций и тестирования может быть реализовано практическое применение полученных знаний.

Цифровая информационная модель как источник данных при эксплуатации объекта. С развитием «цифровых двойников» зданий и Интернета вещей появляется возможность получать актуальную информацию о состоянии объекта и события с визуализацией их точного места. BIM является одной из составляющих «цифрового двойника» здания.

На безопасность объекта кроме прочего влияет ухудшение состояние самого объекта в целом и снижение эффективности инженерных систем, отвечающих за безопасность объекта (рис. 4). Задачей эксплуатации в части обеспечения безопасности объекта является мониторинг состояния объекта и соблюдение требований к обслуживанию объекта и его систем, ремонту и своевременной модернизации элементов объекта при необходимости.

Важно формировать методологии применения BIM и «цифровых двойников» для оценки безопасности объектов строительства. Понимание того, как нужно применять и анализировать данные модели для оценки пожарной безопасности, позволит сформировать необходимый опыт и разработать программные продукты для работы в этом направлении.

¹ СП 2.13130.2009. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

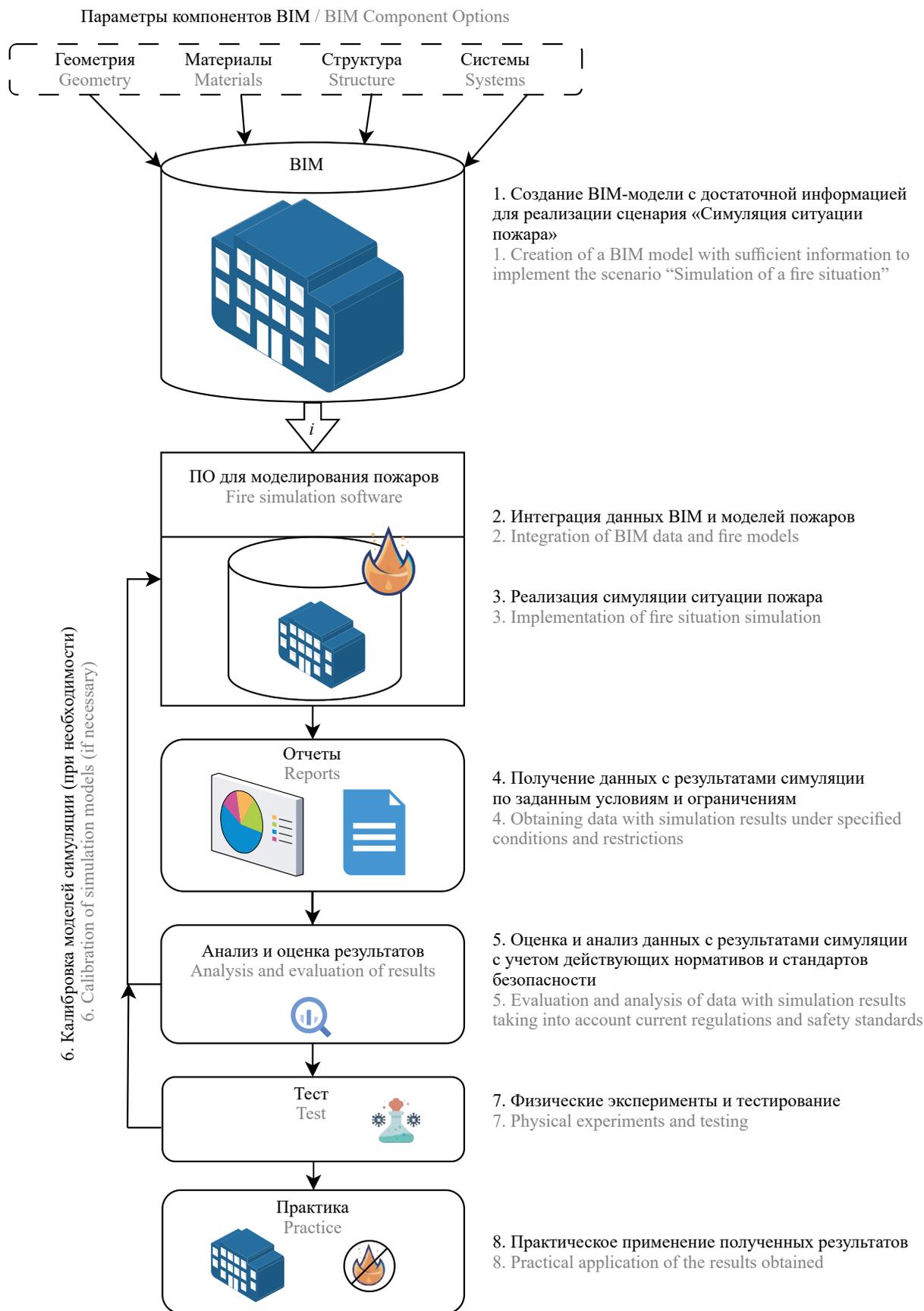


Рис. 3. BIM в сценарии симуляции пожара
Fig. 3. BIM in a fire simulation scenario



Рис. 4. Факторы, связанные с безопасностью
Fig. 4. Safety factors

Общая концепция развития «цифровых двойников» представлена на рис. 5. Согласно исследованию [23], выделяется четыре основных этапа развития «цифрового двойника». Первоначально создается модель геометрии, которая является базовой для построения модели физических процессов. На основе модели физических процессов формируется модель поведения объекта, которая позволяет понять правила, по которым объект отвечает на возмущения разного рода. После чего возможно прогнозирование

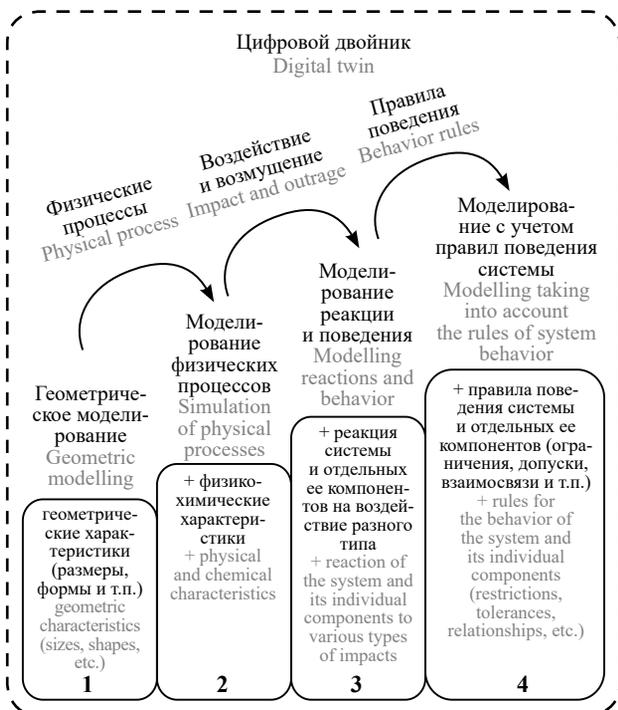


Рис. 5. Развитие «цифрового двойника»
Fig. 5. Development of a “digital twin”

состояния объекта и моделирование поведения объекта. Таким образом, можно говорить о применении «цифрового двойника» для целей диагностики проблем с оборудованием и прогнозного обслуживания.

Выводы

Внедрение новых технологий в любой сфере сопровождается трудностями, связанными с необходимостью наработки опыта применения таких технологий, получения достаточных данных, которые являются обоснованием целесообразности применения современных инструментов в традиционной практике.

Необходимо практическое изучение возможностей полноценного применения современных инструментов технологий информационного моделирования для повышения качества пожарной безопасности зданий, на основе которого будут определены возможности рассматриваемых инструментов.

Из текущих практик на данный момент цифровые информационные модели, разрабатываемые на стадии проектирования, позволяют автоматизировать процесс проверки проектных решений по нормативным требованиям [24], в том числе по требованиям пожарной безопасности.

Применение BIM для пожарных расчетов и моделирования процессов пожара и эвакуации мало распространено. Существуют проблемы интероперабельности между системами автоматизированного проектирования, где разрабатываются модели BIM, и расчетными программными комплексами, применяемыми специалистами по пожарной безопасности.

Также на данный момент важными ограничениями, затрудняющими цифровизацию области пожарной безопасности в строительстве, являются:

- отсутствие комплексного общепринятого метода оценки пожарной безопасности с показателями эффективности противопожарной системы [25, 26];
- трудности в описании некоторых бизнес-процессов, связанных с обеспечением пожарной безопасности на разных этапах жизненного цикла объекта.

Необходима наработка теоретического и практического опыта применения рассматриваемых информационных технологий для задач пожарной инженерии, что позволит:

- сформировать общий подход по согласованному применению указанных инструментов, в том числе совместно со смежными специалистами;
- определить требования к данным, формируемым рассматриваемыми инструментами, и определить способы анализа и применения этих данных для повышения качества применяемых решений в области обеспечения пожарной безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Danzi E., Flores-Quiroz N., Sharma A., Zhang T., Marshall L.* Fire engineering for global grand challenges: Developing a 10-year strategic plan // *Fire Protection Engineering*. Q3. 2023. Vol. 99. URL: https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/c2f91981-c014-4bec-97f4-1225586937ac/UploadedImages/Grand_Challenges/white_papers/SFPE_Foundation_GCI_White_Paper-Energy-Infrastructure.pdf
2. *Wang L., Li W., Feng W., Yang R.* Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology // *Building and Environment*. 2021. Vol. 205. P. 108188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108188
3. *Холицевников В.В., Парфененко А.П.* Корректность компьютерной модели и наша жизнь // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 3. С. 66–94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94
4. *Lovreglio R., Thompson P., Feng Z.* Letter to the editor: Automation in fire safety engineering using BIM and generative design // *Fire Technology*. 2021. Vol. 58. Issue 1. DOI: 10.1007/s10694-021-01153-7
5. *Малодушев С.В.* Моделирование процесса эвакуации в зданиях с учетом количества и местоположения посетителей, определяемых с помощью мобильных устройств : дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2018. 149 с.
6. *Kanangkaew S., Jokkaw N., Tongthong T.* BIM-based and augmented reality combined with a real-time fire evacuation system for the construction industry // July 2023 Conference: The Fifth International Conference on Civil and Building Engineering Informatics at: Bangkok, Thailand. URL: https://www.researchgate.net/publication/372440739_BIM-BASED_AND_AUGMENTED_REALITY_COMBINED_WITH_A_REAL-TIME_FIRE_EVACUATION_SYSTEM_FOR_THE_CONSTRUCTION_INDUSTRY
7. *Маковецкая-Абрамова О.В., Лунева С.К., Гаврюшина А.Г.* BIM-технологии на службе обеспечения безопасности населения // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2020. № 2 (52). URL: <https://sciup.org/bim-tehnologii-na-sluzhbe-obespechenija-bezopasnosti-naselenija-148318844>
8. *Дектерев П.Е., Завьялов В.А.* Основные концепции интеграции информационных моделей объектов строительства и автоматизированных систем управления зданиями // *Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова*. 2016. № 12. DOI: 10.12737/22760
9. *Гусарова А.А., Мокрова Н.В.* Инструменты искусственного интеллекта для информационного моделирования строительных объектов // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : сб. докл. II Национал. науч. конф. 8 декабря 2021 г. М. : НИУ МГСУ, 2022. С. 949–956.*
10. *Huangfu D., Rong L., Wei G.* Application of high-rise building fire rescue based on BIM and GIS. 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3626-7_6
11. *Krämer M., Bender T., Bock N., Härtig M., Jaspers E., Koch S. et al.* IT Environments for BIM in FM. 2023. DOI: 10.1007/978-3-658-40830-5_4. URL: https://www.researchgate.net/publication/371338321_IT_Environments_for_BIM_in_FM
12. *Шеина С.Г., Новоселова И.В., Чернявский И.А.* Организационно-технологические направления по восстановлению объектов после чрезвычайных ситуаций с использованием BIM-технологий // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 11 (95). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7992>
13. *Гусев С.С., Макаров В.В.* Итерационные модели эвакуации людей из здания как компоненты «Умного дома» // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2021. № 3 (37). DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-114-122
14. *Беляев Е.В., Головенко Е.Л., Калгатов С.С., Абдикаримов Е.С.* Интеллектуальное управление эвакуацией людей при пожаре в здании на основе BIM-моделирования // *Вестник науки и образования*. 2021. № 8–2 (111).
15. *Кантемиров А.Ю., Сажин И.С., Калгатов С.С., Душнюк Д.Н., Омурбаева Т.О.* Моделирование эвакуации людей при пожаре в здании с массовым пребыванием людей // *Проблемы науки*. 2021. № 11 (168). С. 41–46.
16. *Незамаев И.В., Сажин И.С., Калгатов С.С., Душнюк Д.Н.* Моделирование и определение параметров процесса эвакуации людей при пожаре объекта защиты с массовым пребыванием людей // *Вестник науки и образования*. 2021. № 9–3 (112). С. 23–28.
17. *Горбунов А.А., Терехин С.Н., Дали Ф.А.* Применение интеллектуальной системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре на основе BIM-моделирования // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. 2019. № 3.
18. *Wang J., Wei G., Dong X.* A dynamic fire escape path planning method with BIM // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021. Vol. 12. Pp. 1–13. DOI: 10.1007/s12652-020-02794-2
19. *Zhang N., Liang Y., Zhou C., Niu M., Wan F.* Study on fire smoke distribution and safety evacuation of subway station based on BIM // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 24. DOI: 12808.10.3390/app122412808
20. *Liu M., Wang G.* Indoor fire simulation in low-rise teaching buildings based on BIM–FDS // *Fire*. 2023. Vol. 6. Issue 5. P. 203. DOI: 10.3390/fire6050203

21. Liu Z., Gu X., Hong R. Fire protection and evacuation analysis in underground interchange tunnels by integrating BIM and numerical simulation // *Fire*. 2023. Vol. 6. Issue 4. P. 139. DOI: 10.3390/fire6040139
22. Kim D.-H., Shin H.-J., Cha H.-S. A Method to establish a fire information visualization structure for 3D/BIM-linked fire response system development // *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2022. Vol. 38. Pp. 253–263. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.1.253
23. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital twin driven smart manufacturing // Academic Press. Singapore. 2019. P. 282.
24. Кузина О.Н. Верификация информационной модели здания на этапе перехода от проектной стадии к строительству (от d-BIM к c-BIM) // *Вестник евразийской науки*. 2017. № 6 (43). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/180TVN617.pdf>
25. Шихалев Д.В. Управленческий аспект в функционировании системы обеспечения пожарной безопасности объекта // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2021. № 2 (39).
26. Шихалев Д.В. Проблемы управления системой обеспечения пожарной безопасности объекта. Ч. 1. Методы оценки // *Проблемы управления*. 2022. № 1. DOI: 10.25728/ru.2022.1.1

REFERENCES

1. Danzi E., Flores-Quiroz N., Sharma A., Zhang T., Marshall L. Fire engineering for global grand challenges: Developing a 10-year strategic plan. *Fire Protection Engineering*. Q3. 2023; 99. URL: https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SFPE/c2f91981-c014-4bec-97f4-1225586937ac/UploadedImages/Grand_Challenges/white_papers/SFPE_Foundation_GCI_White_Paper-Energy-Infrastructure.pdf2023
2. Wang L., Li W., Feng W., Yang R. Fire risk assessment for building operation and maintenance based on BIM technology. *Building and Environment*. 2021; 205:108188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108188
3. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. The correctness of the computer model and our life. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):66-94. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.66-94 (rus).
4. Lovreglio R., Thompson P., Feng Z. Letter to the editor: Automation in fire safety engineering using BIM and Generative Design. *Fire Technology*. 2021; 58(1). DOI: 10.1007/s10694-021-01153-7
5. Malodushev S.V. *Modeling the evacuation process in buildings taking into account the number and location of visitors determined using mobile devices : thesis of a candidate of technical sciences*. Petrozavodsk, 2018; 149. (rus).
6. Kanangkaew S., Jokkaw N., Tongthong T. BIM-based and augmented reality combined with a real-time fire evacuation system for the construction industry. *July 2023 Conference : The Fifth International Conference on Civil and Building Engineering Informatics at: Bangkok, Thailand*. URL: https://www.researchgate.net/publication/372440739_BIM-BASED_AND_AUGMENTED_REALITY_COMBINED_WITH_A_REAL-TIME_FIRE_EVACUATION_SYSTEM_FOR_THE_CONSTRUCTION_INDUSTRY
7. Makovetskaya-Abramova O.V., Luneva S.K., Gavryushina A.G. BIM-technologies on population security service. *Technical and technological problems of the service*. 2020; 2(52). URL: <https://sciup.org/bim-tehnologii-na-sluzhbe-obespechenija-bezopasnosti-naselenija-148318844> (rus).
8. Dekterev P.E., Zavyalov V.A. Fundamental concepts of integration of building information models and building management systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 12. DOI: 10.12737/22760 (rus).
9. Gusarova A.A., Mokrova N.V. Artificial intelligence tools for information modeling of construction projects. *Current problems of the construction industry and education : collection of reports of the Second National Scientific Conference, December 08, 2021*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2022; 949-956. (rus).
10. Huangfu D., Rong L., Wei G. *Application of High-Rise Building Fire Rescue Based on BIM and GIS*. 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3626-7_6
11. Krämer M., Bender T., Bock N., Härtig M., Jaspers E., Koch S. et al. *IT Environments for BIM in FM*. 2023. DOI: 10.1007/978-3-658-40830-5_4. URL: https://www.researchgate.net/publication/371338321_IT_Environments_for_BIM_in_FM
12. Sheina S.G., Novoselova I.V., Chernyavsky I.A. Organizational and technological directions for the restoration of objects after emergency situations using BIM technologies. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022; 11(95). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7992> (rus).
13. Gusev S.S., Makarov V.V. Iterative models of evacuation of people from the building as components of the “smart home”. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021; 3(37). DOI 10.52684/2312-3702-2021-37-3-114-122 (rus).
14. Belyaev E.V., Golovenko E.L., Kalgatov S.S., Abdikarimov E.S. Intelligent evacuation management in a fire in a building based on bim modeling. *Bulletin of Science and Education*. 2021; 8-2(111). (rus).
15. Kantemirov A.Yu., Sazhin I.S., Kalgatov S.S., Dushnyuk D.N., Omurbaeva T.O. Modeling the evacuation of humanities in a fire in a building with a massive personee. *Problems of Science*. 2021; 11(168):41-46. (rus).

16. Nezamaev I.V., Sazhin I.S., Kalgatov S.S., Dushnyuk D.N. Modeling and determination of the parameters of the evacuation process of human beings in the fire of the protected object with mass stay of people. *Bulletin of Science and Education*. 2021; 9-3(112):23-28. (rus).
17. Gorbunov A.A., Terekhin S.N., Dali F.A. Use of intelligent warning system managements of evacuation of people for fire on basis to BIM-modelling. *Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2019; 3. (rus).
18. Wang J., Wei G., Dong X. A dynamic fire escape path planning method with BIM. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021; 12:1-13. DOI: 10.1007/s12652-020-02794-2
19. Zhang N., Liang Y., Zhou C., Niu M., Wan F. Study on fire smoke distribution and safety evacuation of subway station based on BIM. *Applied Sciences*. 2022; 12:12808. DOI: 10.3390/app122412808
20. Liu M., Wang G. Indoor fire simulation in low-rise teaching buildings based on BIM-FDS. *Fire*. 2023; 6:203. DOI: 10.3390/fire6050203
21. Liu Z., Gu X., Hong R. Fire protection and evacuation analysis in underground interchange tunnels by integrating BIM and numerical simulation. *Fire*. 2023; 6:139. DOI: 10.3390/fire6040139
22. Kim D.-H., Shin H.-J., Cha H.-S. A method to establish a fire information visualization structure for 3D/BIM-linked fire response system development. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2022; 38:253-263. DOI: 10.5659/JAIK.2022.38.1.253
23. Tao F., Zhang M., Nee A.Y.C. Digital twin driven smart manufacturing. *Academic Press*. Singapore, 2019; 282.
24. Kuzina O.N. Verification of a building information model at the stage of transition from the design stage to construction (from d-BIM to c-BIM). *Bulletin of Eurasian Science*. 2017; 6(43). (rus).
25. Shikhalev D.V. Management aspect in the functioning of the fire safety system of an object. *Modern problems of civil protection*. 2021; 2(39). (rus).
26. Shikhalev D.V. Problems of managing the fire safety system of a facility. Part I: Assessment methods. *Control Sciences*. 2022; 1:2-14. DOI: 10.25728/cs.2022.1.1 (rus).

Поступила 26.09.2023, после доработки 24.10.2023;

принята к публикации 15.11.2023

Received September 26, 2023; Received in revised form October 24, 2023;

Accepted November 15, 2023

Информация об авторе

ГУСАРОВА Алла Александровна, аспирант кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; PИHЦ ID: 94654; ORCID: 0000-0003-1940-1552; e-mail: 2609gaa@gmail.com

Information about the author

Alla A. GUSAROVA, Graduate Student of Department of Mechanization and Automation of Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 296055; ORCID: 0000-0003-1940-1552; e-mail: 2609gaa@gmail.com