

УДК 331.45

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

Федосов¹ С.В., Король¹ Е.А., Баканов² М.О.

¹ ФГБОУ ВО Национальный исследовательский «Московский государственный строительный университет», fedosovsv@mgsu.ru, KorolEA@mgsu.ru

² ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия» ГПС МЧС России, mask-13@mail.ru

Аннотация. Ключевым вопросом в современном строительстве является обеспечение безопасных условий труда для работников на стройплощадках. Направления совершенствования строительной отрасли способствует расширению научных и прикладных исследований в области обеспечения безопасных условий труда для работников и внедрению новых форм и методов с целью всестороннего охвата инструментов, способствующих применению различных цифровых технологий в области охраны труда в строительстве. Активный переход отрасли промышленного и гражданского строительства на более высокий уровень конкурентоспособности во многих странах мира связан с созданием информационных моделей объектов строительства (ИМ/ВИМ). В работе был проведен анализ путем сравнения внедрения различных цифровых инструментов в ИМ, которые направлены на обеспечение безопасных условий труда в строительстве. Совокупность направлений исследований типологизирована по следующим направлениям, которые конкретизируют специфику областей применения технологий и методов организации охраны труда в строительстве: управление профессиональными рисками; оценка условий труда; визуализация производственных операций и методов; моделирование производственных площадок; профилактика производственного травматизма; обучение правилам охраны труда. По полученным результатам были определены преимущества и недостатки цифровых инструментов, используемых для обеспечения безопасных условий труда на основе ИМ. Исследованы показатели производственного травматизма и несчастных случаев и их причины. Приведенная аналитика свидетельствует о том, что строительная отрасль по количеству погибших на производстве имеет высокие показатели наравне с обрабатывающей промышленностью, что демонстрирует необходимость поиска современных методов организации и контроля условий техники безопасности и охраны труда в строительстве. Показано, что нормативная правовая и нормативно-техническая база для внедрения технологий информационного моделирования активно развивается, что создает основу для реализации практических задач проектирования и эксплуатации зданий на всех этапах жизненного цикла объекта. Определены целевые направленности способов в границах обозначенных направлений исследований по внедрению цифровых инструментов в ИМ, обозначены основные технологии и методы реализации, предложенных инструментов.

Предмет исследования: цифровые инструменты, используемые для ИМ как совокупность технологий, обеспечивающих организацию, анализ и оценку безопасных условий труда в строительстве.

Материалы и методы: При определении тенденций развития ВИМ – технологий в контексте обеспечения безопасных условий труда в строительстве нами был произведен анализ применения данных технологий в следующих концептуальных направлениях: управление строительным производством и охраной труда; 4-D планирование работ и расписаний производственных задач; визуализация и/или имитационное моделирование; взаимодействие и коммуникации; определение вредных факторов производства. В ходе анализа были определены преимущества и недостатки использования информационного моделирования в контексте совершенствования организации охраны труда в строительстве по каждому из концептуальных направлений развития ВИМ – технологий. На основе анализа нормативных правовых актов и нормативно-технической документации определена совокупность источников, показывающая динамику развития и внедрения информационного моделирования объектов капитального строительства в России.

Результаты: Следует отметить тот факт, что использование ИМ повышает результативность применения на их основе различных баз данных и динамических библиотек, которые помогают идентифицировать различные профессиональные риски и вырабатывать комплекс проектных решений для обеспечения безопасных условий работы при строительстве объектов. В том числе способствует более прозрачному обмену информацией между программными средствами, разработанными для расчетов параметров безопасности и цифровыми решениями по алгоритмам оценки условий труда. Перечисленные преимущества технологий, основанных на базах данных, значительно облегчат коммуникацию между специалистами по охране труда и будут способствовать большей детализации и корреляции профессиональных рисков с конкретными проектными решениями. Интеграция баз данных аварийных ситуаций на строительных площадках в ИМ может значительно снизить количество прецедентов и травматизма за счет проведения превентивных мероприятий по устранению потенциально опасных источников получения травм для работников на строительных площадках. Вместе с тем возможность визуализации различных вариантов защитных (сигнальных) ограждений и знаков безопасности на строительных площадках при информировании работников о зонах, в которых могут воздействовать потенциально опасные производственные факторы, способствует их эффективному обучению и минимизации рисков получения травм и несчастных случаев. Однако, ряд специалистов по охране труда считают, что применение ИМ для обеспечения безопасных условий труда для работников строительной отрасли осложняется постоянным изменением и совершенствованием (обновлением) программных продуктов, что в значительной степени экономически не эффективно по сравнению с классическими методами организации охраны труда на строительных площадках. При этом, обучение специалистов по охране труда, архитекторов и проектировщиков с особенностями работы с ИМ и интегрированными программными продуктами по обеспечению безопасных условий труда в строительстве, безусловно, является целесообразным.

Выводы: Авторами, была предпринята попытка типологизировать актуальные исследования в области интеграции цифровых и аппаратно-программных решений в ИМ по вопросам охраны труда в строительстве. Цифровые технологии

активно развиваются, программные комплексы для автоматизированного проектирования объектов строительства дополняются и функционально совершенствуются, поэтому результаты исследования являются отправной точкой при разработке направлений исследований в данной области. Результаты исследований дополняют и обобщают многочисленные исследования и разработки в области применения ИМ в области охраны труда в строительстве. Прикладная ценность исследования заключается в возможности непосредственного применения полученных результатов и выводов для работников, которые непосредственно заняты в сфере разработки и проектирования ИМ, а также для исследователей в области охраны труда в строительстве.

Ключевые слова: информационная модель объекта строительства, цифровое решение, охрана труда в строительстве, безопасные условия труда, травматизм, несчастный случай.

ВВЕДЕНИЕ

Охрана труда представляет собой комплекс мероприятий, которые являются составной частью системы сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности [1].

В области строительства высок риск получения производственных травм, которые могут вести к летальным исходам. Данный факт определяется наличием большого количества операций, выполняемых работниками вручную с применением механизированного инструмента на строительной площадке, а также на высоте, где существует риск несчастного случая. Следует также учитывать влияние на работников внешних факторов окружающей природной среды (дождь, снег, высокая или отрицательная температура воздуха и др.), высокий уровень шума и многое другое.

Генрих Г.У. [2], который является основоположником системы предотвращения несчастных случаев на производстве, проанализировав статистический материал по количеству и характеру получаемых травм работниками на производстве, разработал пирамиду производственного травматизма, которая получила название Закон Генриха (рис. 1). Разработанная им пирамида (пирамида Генриха), является одним из основных принципов в системе управления охраной труда на производстве.



Рис. 1. Пирамида промышленной безопасности Генриха
Fig. 1. Heinrich's Industrial Safety Pyramid

Исходя из данных, представленных на рис. 1, необходимо учитывать, что на единицу летального исхода на производстве приходится до 30 несчастных случаев с тяжелыми последствиями для здоровья (инвалидность), 300 случаев получения легких травм, при которых работники смогли сами оказать себе помощь, 3 000 микротравм и более 30 000 реализованных опасных действий и/или нарушений условий труда, которые потенциально могли привести к травматизму или летальному исходу.

Технологии строительного производства стремительно развиваются, растут масштабы городской застройки, проектируются и разрабатываются сложные строительные конструкции и сооружения, что определяет необходимость внедрения актуальных решений для систематизации строительных операций и уменьшения сроков сдачи объектов строительства в эксплуатацию. Вместе с тем появляется необходимость совершенствования системы охраны труда в строительстве, внедрения современных технологий и способов, которые позволяют рационально контролировать выполнение требований по охране труда работниками.

Количество погибших на производстве в 2021 году составляет 1 338 человек [3], что по оперативным данным на 208 человек или на 18,4% выше, чем в 2020 году (1 130 человек) (рис. 2). По видам экономической деятельности наибольшее количество несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями приходится на следующие отрасли экономики [3]:

- обрабатывающие производства (25% от общего количества);
- строительство (15,7%);
- транспортировка и хранение (12,5%);
- сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство (8,5%);
- добыча полезных ископаемых (7,7%).

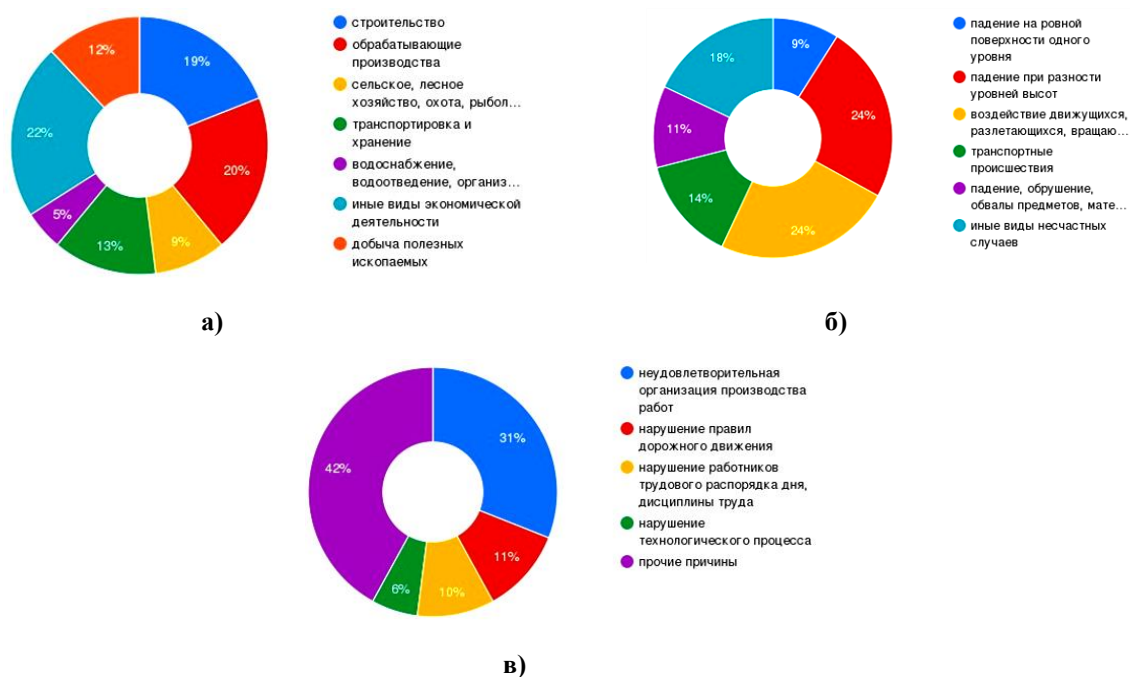


Рис. 2. Структура распределения количества погибших на производстве, видов несчастных случаев и их причины: а) количество погибших на производстве в разрезе видов экономической деятельности; б) виды (типы) несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями; в) причины несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями

Fig. 2. Distribution structure of the number of deaths at work, types of accidents and their causes: а) the number of deaths at work by type of economic activity; б) types (types) of industrial accidents with severe consequences; в) the causes of accidents at work with serious consequences

Анализ состояния производственного травматизма с тяжелыми последствиями в разрезе основных видов экономической деятельности показал, что в число видов экономической деятельности с наибольшим количеством несчастных случаев за 2021 год вошли такие виды экономической деятельности, как обрабатывающие производства, строительство, транспортировка и хранение, сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство (рис. 2а) [3].

Анализ типологии видов несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями, происшедших в 2021 году в Российской Федерации, свидетельствует о том, что наибольшее количество несчастных случаев происходит в результате следующих видов происшествий (рис. 2б):

- падение при разности уровней высот – 24 %;
- воздействие движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей, машин и т.д. – 24 %;
- транспортные происшествия – 14 %;
- падение, обрушение, обвалы предметов, материалов, земли и пр. – 11 %;
- падение на ровной поверхности одного уровня – 9 %.

В общей структуре причин несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями за 2021 год наибольшую долю занимают следующие причины (рис. 2в):

- неудовлетворительная организация производства работ – 31 %;
- нарушение правил дорожного движения – 11 %;
- нарушение работником трудового распорядка и дисциплины труда – 10 %;
- нарушение технологического процесса – 6 %.

Приведенная аналитика свидетельствует о том, что строительная отрасль по количеству погибших на производстве имеет высокие показатели наравне с обрабатывающей промышленностью, что определяет необходимость поиска современных методов организации и контроля условий техники безопасности и охраны труда в строительстве.

На сегодняшний день одной из самых перспективных технологий в области охраны труда в строительстве можно выделить BIM/ТИМ (*Building information modeling / Технологии информационного моделирования*) – информационную модель зданий и сооружений (ИМ), созданную коллективным способом посредством использования проекта (модели) будущего сооружения. Представленная технология является универсальным инструментом, который позволяет внедрять различные программные модули в 3-D модель здания на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства. В целом, ТИМ можно рассматривать как объектно-ориентированный подход [4], который

позволяет управлять сложной системой информации, включая трехмерные визуальные средства [5-7]. Особенности ТИМ позволяют оценивать проектную деятельность организации и управлять всеми операциями в пределах спроектированной среды с возможностью запроса из базы данных, которая содержит как геометрические, так и нормативно-технические данные об объекте [8-9].

Целью работы является выявление характерных преимуществ и недостатков ТИМ технологий в области охраны труда в строительстве, определение перспектив и направлений развития технологии.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить тенденции развития ТИМ в области охраны труда в строительстве;
2. Выявить характерные преимущества ТИМ и их недостатки;
3. Рассмотреть конкретные примеры применения ТИМ в области охраны труда в строительной отрасли;
4. Определить пути развития ТИМ в контексте обеспечения безопасных условий работы на производственных строительных площадках;
5. Ознакомить отечественных специалистов в области строительства с ТИМ в части обеспечения охраны труда;
6. Проследить процесс развития и применения ТИМ в строительстве.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Стремительное развитие информационных технологий последовательно меняет все сферы науки, знаний и производства, предоставляя в распоряжение пользователей современные инструменты, позволяющие более эффективно решать поставленные перед ними задачи.

Тенденция, при которой наблюдается внедрение информационных технологий в различные сферы жизни человека и общества, называется «*Industry 4.0*» («*Индустрия 4.0*»). Она опирается на совместную интеграцию таких информационно-телекоммуникационных направлений, как оцифровка данных, облачные вычисления, искусственный интеллект, роботизация производства и технологических задач и интернет вещей [10-13].

Строительство тоже в значительной степени подвержено влиянию новых цифровых инструментов, поэтому некоторые авторы определяют этот процесс термином «*Construction 4.0*» («*Строительство 4.0*») [14]. Среди цифровых технологий, которые трансформируют строительство, процесс ТИМ [15] играет ключевую роль благодаря своему широкому и междисциплинарному применению в области архитектуры, проектирования, строительства и эксплуатации (*architecture, engineering, construction, and operations – AECO*) зданий [8].

В России впервые на уровне Правительства вопрос развития и разработки информационных технологий был рассмотрен на заседании в 2013 году, по результатам которого по вопросу «О проекте «дорожной карты» по развитию информационных технологий» определена важность этой отрасли для экономики страны. Минстроем РФ был подготовлен Приказ от 29 декабря 2014 года № 926/пр «Об утверждении Плана поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства» [16, 17]. Подробная динамика и структура развития законодательной и нормативно-технической базы в области информационного моделирования в строительстве в России показана на рис. 3.



Рис. 3. Нормативная документация для информационного моделирования в строительстве
Fig. 3. Normative documentation for information modeling in construction

Как показано на рис. 3, период с 2016 года характеризуется активным развитием нормативной правовой и нормативно-технической базы для внедрения технологий информационного моделирования, которая создает основу для реализации практических задач проектирования и эксплуатации зданий на всех этапах жизненного цикла объекта. В настоящее время наблюдается наполнение баз данных не только показателями стоимости, но и техническими характеристиками.

Основными направлениями исследований в области интеграции цифровых инструментов в ИМ в контексте охраны труда являются следующие тематики (табл. 1): управление профессиональными рисками; оценка условий труда; визуализация производственных операций и методов; моделирование производственных площадок; профилактика производственного травматизма; обучение правилам охраны труда.

Таблица 1. Направления исследований в области интеграции цифровых инструментов в ИМ в контексте охраны труда

Table 1. Research directions in the field of integration of digital tools into BIM in the context of labor protection

№ п/п	Область исследований	Описание
1	Управление профессиональными рисками	Интегрированные в ИМ базы данных о потенциальных профессиональных рисках, связанных с различными опасностями, которые позволяют принимать соответствующие решения в части компенсирующих мероприятий в рамках процедуры управления профессиональными рисками системы управления охраной труда на стадиях проектирования и строительства объектов.
2	Оценка условий труда	Цифровые данные, позволяющие на стадии проектирования прогнозировать и оценивать форму, размеры и площадь строительных площадок, а также потенциальных производственных процессов и операций.
3	Визуализация производственных операций и методов	Цифровые данные, позволяющие использовать в ИМ динамическую визуализацию мероприятий по обеспечению безопасных условий труда на строительной площадке.
4	Моделирование производственных площадок	ИМ могут позволить проектировщикам рассчитывать и идентифицировать места на строительных площадках, на которых может появиться потенциальная опасность работникам.
5	Профилактика производственного травматизма	Сочетание ИМ с профилактическими технологиями может обеспечить постоянный контроль и мониторинг материалов, перемещения работников и оборудования по строительной площадке.
6	Обучение правилам охраны труда	Цифровые решения, направленные на обучение работников и обучающихся правилам охраны труда посредством интегрированных информационных средств в ИМ

Управление профессиональными рисками

Исследования, относящиеся к этому направлению, основаны на разработке системы управления охраной труда на основе баз данных, интегрированных в ИМ. В базы данных заносятся проанализированные нормативно-технические документы в контексте тех производственных задач, которые относятся к конкретным объектам капитального строительства, также появляется возможность размещать инструкции по охране труда при работе с различным строительным инструментом и с учетом специфики производственных задач и процессов [18]. Таким образом, большинство исследований опираются на подход «*Prevention through Design (PtD)*», который направлен на обеспечение безопасности работников на протяжении всего жизненного цикла объекта капитального строительства на этапе разработки проекта. На основе алгоритма извлечения и оценки атрибутивной информации в *Revit* был разработан автоматизированный модуль проверки на основе программной аналитики данных, объединяющий ИМ и базу знаний *PtD*. Так, авторы [19] предлагают методологию, которая состоит из четырех этапов, включая количественную оценку профессионального риска на уровне выбора элементов строительных конструкций, интеграцию

4-D модели со значениями показателей профессионального риска, оценку профессионального риска, выбор альтернативного варианта строительных конструкций. В работе [20] авторы интегрировали в ИМ базу данных потенциальных профессиональных рисков, которая на основании атрибутивных данных позволяет создавать карты потенциальных профессиональных рисков.

Авторами [21] предложена библиотека «*Design for Safety (Dfs)*», которая интегрирована в ИМ, позволяющая производить анализ потенциальных профессиональных рисков и требований охраны труда. В работе [22] рассмотрены варианты применения ИМ для оценки и минимизации рисков на этапах проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Представлена концептуальная модель, показывающая взаимосвязь пирамиды несчастных случаев с моделью приемлемого риска. Рассмотрено применение методики оценки риска по травмоопасности на основе ИМ на конкретном объекте, в результате чего получен средний индекс безопасности.

Появляются исследования, которые затрагивают конкретные объекты капитального строительства на основе анализа потенциальных профессиональных рисков. Так, например, авторами [23] предлагается

специальная структура группировки и анализа профессиональных рисков «*Risk Breakdown Structure (RBS)*» и последовательная интеграция модуля в ИМ для проектирования и строительства мостов. Авторы [24] разработали экспертную систему идентификации потенциальных профессиональных рисков на основе ИМ для строительства туннелей.

Также проводятся исследования, в которых предлагаются базы данных, интегрированные в ИМ,

на основе анализа несчастных случаях на строительных площадках и потенциально опасных производственных зонах [25, 26].

Концептуально цифровые системы, интегрированные в ИМ модели по анализу потенциальных профессиональных рисков, несчастных случаев и прецедентов по нарушению правил охраны труда, иерархически можно представить функциональной схемой, приведенной на рис. 4.

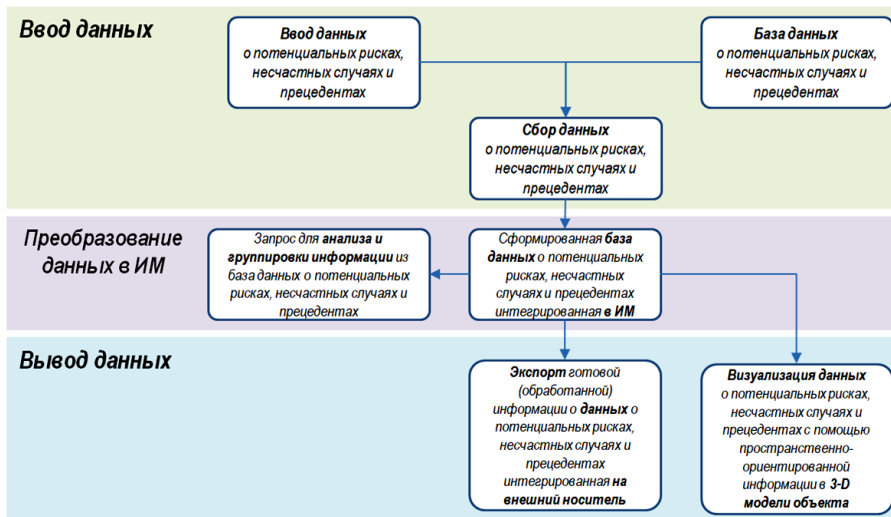


Рис. 4. Функциональная схема цифровых систем, интегрированных в ИМ, на основе анализа профессиональных рисков
Fig. 4. Functional diagram of digital systems integrated in BIM based on occupational risk analysis

Принципиально цифровые системы строятся по принципу: ввод данных – преобразование данных – вывод данных. На каждом этапе происходит сбор данных, интеграция их в ИМ (преобразование в метаданные), после чего они экспортируются на внешний носитель или отображаются на 3-D модели объекта (рис. 5).



Рис. 5. Иллюстрация вариаций визуализации метаданных цифровых систем, интегрированных в ИМ
Fig. 5. Illustration of variations in the visualization of metadata of digital systems integrated in BIM

Оценка условий труда

Тенденции в области разработки цифровых решений для контроля соблюдения правил по охране труда на строительных площадках, которые интегрированы в ИМ объектов капитального строительства, характеризуются появлением

актуальных научных исследований, в которых рассмотрены принципы идентификации, предотвращения и контроля за опасными производственными факторами на строительных площадках и предложены инструменты по оценке уровня защиты от них.

Авторы [27,28] предлагают внедрение «*Intelligent Productivity and Safety System (IPASS)*», которая основана на механизме индикации зон, в которых постоянно действуют или могут действовать опасные факторы, связанные или не связанные с характером выполняемых работ, на этапе проектирования объекта капитального строительства в различных автоматизированных программных комплексах, реализующих принцип ТИМ. Также в ряде работ [29-31] предложены интегрированные варианты цифровых инструментов, которые позволяют проектировать и отображать варианты защитных (сигнальных) ограждений и знаков безопасности на строительных площадках для целей информирования работников о зонах, в которых могут воздействовать потенциально опасные производственные факторы. Авторы [32] предлагают проектировать мероприятия по обеспечению безопасных условий охраны труда на основе разработанных баз данных, в которых собирается проанализированная информация по зонам потенциально опасных и постоянно действующих производственных факторов на строительных площадках в соответствии с характером выполняемых работ, состояния строительных машин, инструмента, технологической оснастки и средств коллективной защиты. Аналогичные разработки продемонстрированы в работе [33], с указанием на трехмерном объекте капитального строительства метаданных, полученных на основе анализа аварийных ситуаций на строительных площадках, интегрированных в ИМ из баз данных.

Похожие разработки предлагают авторы [34-36]. Отличием данных цифровых решений является конкретизация объектов капитального строительства, например, выполнение строительных работ под землей и строительство фундаментов глубокого заложения, с учетом специфики методов выполнения работ, используемых материалов, конструкций, машин, инструмента, инвентаря, технологической оснастки, оборудования и транспортных средств.

Встречаются разработки с применением технологии *PtD* [37]. Цифровое решение, предлагаемое авторами, заключается в разработке независимо компилируемого программного модуля, который динамически подключается в автоматизированный программный комплекс, реализующий принцип ТИМ, позволяющий производить сопоставление конкретных проектных решений по безопасности труда, направленных на обеспечение выполнения нормативных требований безопасности труда с разработанной организационно-технологической документацией. Такое решение позволяет разрабатывать альтернативные проектные решения по безопасности труда на основе анализа практики проектирования характерных объектов капитального строительства.

Особое внимание исследователей направлено на одну из самых частых причин летальных исходов на

строительной площадке – падение с высоты. Так, в работе [38] рассмотрены цифровые решения на основе модели проектирования «*Industry Foundation Class (IFC)*», позволяющие определить зоны постоянно действующих и потенциально опасных производственных факторов, а также границы зон, на которых должны быть установлены защитные (сигнальные) ограждения и знаки безопасности, чтобы минимизировать риск падения с высоты работников строительной площадки. Аналогично, авторы [39] разработали алгоритм, основанный на анализе обязательных требований по обеспечению безопасных условий труда для характерных объектов, и на основе полученных данных разрабатывают графики выполнения совмещенных работ, обеспечивающих безопасные условия труда.

Отдельная группа работ посвящена автоматизации анализа разработанной организационно-технологической документацией и проектных решений по безопасности труда в контексте эксплуатации строительных машин, грузоподъемных кранов и строительных лесов [40-43].

Визуализация производственных операций и методов

4D-модели встречаются значительно реже по сравнению с уже хорошо известными и применяемыми *3D*-моделями. *4D* моделирование – это добавление в классическое *3D*-представление еще одного измерения – времени. Получается наглядная демонстрация строительства объекта с помощью пространственно-временной модели. В *4D*-моделях появляется возможность интеграции цифровых решений, которые позволяют прогнозировать основные маршруты перемещения для работников, учитывая возможные маршруты движения транспортных средств, работающих строительных машин и оборудования, разбивая строительную площадку на зоны постоянно действующих и потенциально опасных производственных факторов [44-46].

В работах [47-48] изложены основные результаты по разработке цифрового решения для ИМ, позволяющие планировать маршруты перемещения работников в соответствии с графиком выполнения совмещенных работ, обеспечивающих безопасные условия труда при строительстве железных дорог и мостов. Авторы [49] предлагают использовать технологии виртуальной реальности для информирования и обучения работников безопасным маршрутам перемещения по строительным площадкам с учетом зон постоянно действующих и потенциально опасных производственных факторов.

Моделирование производственных площадок

Исследования в данной области направлены на идентификацию и анализ проектных решений по безопасности труда в контексте размещения на строительных площадках материалов, конструкций, машин и оборудования, в соответствии с основными

маршрутами перемещения работников. Основная цель – минимизация перегруженности рабочей зоны потенциально опасными факторами для случаев, когда возможно пересечение маршрутов движения работников и траекторий движения оборудования, машин и их частей на строительной площадке. Цифровые решения в виде пространственно-временной модели интегрируются в ИМ для целей информирования и анализа рабочих зон на строительных площадках с наложением различных средств визуализации траекторий движения машин, оборудования или их частей и рабочих органов. На основе анализа проектного решения предлагаются компенсирующие мероприятия или конкретные предложения по сокращению количества материалов, конструкций, машин, оборудования или их частей, рабочих органов, инструмента, инвентаря, технологической оснастки, оборудования и транспортных средств в целях обеспечения безопасных условий труда для работников.

Так, в работе [50] разработано цифровое решение, в основе которого заложен анализ полученных травм в соответствии с конкретной обстановкой в рабочей зоне на строительных площадках. Программный модуль генерирует минимально допустимые требования к размещению оборудования, маршрутам перемещения работников и траекторий движения строительных машин, их частей и рабочих органов. Авторы [51,52] предлагают 4-D модель в ИМ для моделирования рабочей зоны с учетом потенциально возможных пересечений маршрутов перемещения работников и строительных машин. Работа [53] посвящена анализу траекторий перемещения работников по строительной площадке, которую возможно корректировать в зависимости от особенностей функционирования различного оборудования и строительных машин. На основе системы внутреннего позиционирования (*IPS*) и с помощью *bluetooth*-маяков происходит отслеживание маршрутов движения работников по строительной площадке и наложение их на ИМ. В работе [54] была предложена аналогичная технология, с применением *GPS* – трекеров, которые были смонтированы на строительных касках строителей, что позволяло в режиме реального времени производить мониторинг маршрутов перемещения работников и производить их корректировку с учетом движения строительной техники с последующим наложением в ИМ.

Особую роль в рассматриваемых направлениях исследований играют технологии моделирования потенциальных угроз столкновения строительных кранов или их рабочих органов. Так, в работе [55] предлагается цифровое решение, направленное на прогнозирование и 4-D моделирование рабочих операций башенными кранами в рабочих зонах с учетом работы другой строительной техники и маршрутов перемещения работников на строительной площадке и дальнейшей интеграцией в ИМ. Аналогичные исследования представили

авторы [56], разработав технологию навигации строительного крана, с учетом условий работы в слепых зонах.

Профилактика производственного травматизма

Вопросы разработки и выполнения профилактических мероприятий по предупреждению производственного травматизма при строительстве представляют значительный интерес для разработчиков и исследователей. Возможность использования метаданных и различных аналитических систем контроля, которые могут быть интегрированы в ИМ, позволяет качественно пересмотреть методы организации и предоставления информации о зонах возможного воздействия на работника опасных и вредных производственных факторов.

Появляются исследования, которые направлены на разработку приборов контроля с последующей интеграцией данных в ИМ. Авторы [57] предложили аппаратно-программный комплекс мониторинга предельно допустимых значений вредных производственных факторов в закрытых пространствах (*«Confined Spaces Monitoring System» – CoSMoS*). В качестве примера разработчики распределили на строительной площадке приборы контроля показаний кислорода и температуры воздуха с отображением точек их монтажа на трехмерной ИМ. Показания после анализа передавались на сервер, далее посредством *Wi-Fi* отображались на портативных устройствах ответственных лиц по вопросам охраны труда и техники безопасности. В работе [58] произведено усовершенствование системы *CoSMoS* в части добавления метаданных в 4-D модель объекта строительства визуальными средствами и аналитическими данными, а также средствами оповещения работников на строительной площадке.

Интересные результаты представлены в работе [59]. Разработчики предлагают независимо компилируемый программный модуль, позволяющий в режиме реального времени представлять информацию о температурно-влажностном режиме на строительной площадке, получаемую с приборов контроля. Технология реализована с использованием *RFID*-меток (*«Radio frequency identification»*) и беспроводных сенсорных сетей. Технологии применения *RFID*-меток могут использоваться также для отслеживания маршрутов перемещения работников по строительной площадке в режиме реального времени с отображением метаданных в ИМ [60].

Авторы [61] рассмотрели применение алгоритмов обработки маршрутов перемещения работников по строительной площадке (*«Worker trajectory analysis system» – WoTAS*), которые позволяют визуализировать и прогнозировать маршруты с целью определения наиболее вероятных мест их пересечения, с зонами постоянно действующих опасных производственных факторов и отображением метаданных в ИМ. Также при отслеживании маршрутов движения работников по строительной площадке появляется возможность

идентифицировать потенциальные профессиональные риски для работников и отображать визуальную информацию в ИМ в целях предупреждения несчастных случаев [62, 63]. Широкий спектр технологий, который можно применять для определения местонахождения работников на строительной площадке, позволяет применять такие решения, как «Bluetooth low energy – BLE» [64] и GPS [65].

Обучение правилам охраны труда

ИМ могут быть использованы в качестве интерактивного инструмента для специального обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда. Технологии виртуальной и дополненной реальности могут выступать в качестве инструмента визуализации прецедентов несчастных случаев на строительных площадках, а также для проведения обучения работников мероприятиям по безопасности производства работ.

В работе [66] предложена технология управления и визуализации безопасности, которая позволяет в ИМ посредством технологии дополненной реальности демонстрировать оптимальные места расположения сигнальных ограждений и знаков безопасности, а также безопасные места для эвакуации работников для случаев возникновения угрозы безопасности и их здоровью.

Авторы [67] продемонстрировали возможность применения технологии виртуальной реальности, интегрированной в ИМ, для обучения работников мероприятиям по безопасности производства работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При определении тенденций развития ТИМ в контексте обеспечения безопасных условий труда в строительстве нами был произведен анализ применения данных технологий в следующих концептуальных направлениях: управление строительным производством и охраной труда; 4-D планирование работ и расписаний производственных задач; визуализация и/или имитационное моделирование; взаимодействие и коммуникации; определение вредных факторов производства. В ходе анализа были определены преимущества и недостатки использования информационного моделирования в контексте совершенствования организации охраны труда в строительстве по каждому из концептуальных направлений развития ТИМ. На основе анализа нормативных правовых актов и нормативно-технической документации определена совокупность источников, показывающая динамику развития и внедрения информационного моделирования объектов капитального строительства в России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Обобщение результатов исследований в области применения различных цифровых технологий для ИМ в контексте мероприятий и решений по определению технических средств и методов работ для конкретных видов выполняемых процессов и операций, обеспечивающих выполнение требований по охране труда, позволяет выделить основные направления развития исследований в данной области, а именно: управление профессиональными рисками; оценка условий труда; визуализация производственных операций; моделирование строительных площадок; профилактика травматизма; обучение правилам охраны труда.

Способы, отнесенные к первому направлению, имеют следующие *целевые направленности*:

а) на интеграцию в ИМ баз данных профессиональных рисков, связанных с различными опасностями;

б) на разработку баз данных прецедентов несчастных случаев и категорирование травматизма на строительных площадках на основе их анализа;

с) на разработку и последующую интеграцию алгоритмов расчета показателей профессиональных рисков в ИМ;

д) на разработку компенсирующих мероприятий в рамках процедуры управления профессиональными рисками системы управления охраной труда на стадиях проектирования и строительства объектов.

Используемые для реализации указанных способов *инструменты* являются:

1. технология организации безопасных условий труда на стадии проектирования объекта строительства в соответствии с нормативно-технической документацией по охране труда;

2. динамические библиотеки профессиональных рисков, интегрированные в ИМ;

3. независимо компилируемые программные модули, динамически подключаемые к программным комплексам для автоматизированного проектирования объектов строительства по оценке вероятности профессионального риска и последствий прецедентов несчастных случаев и травматизма на строительных площадках.

Второе направление исследований, отражает способы, к которым можно отнести следующие *целевые направленности*:

а) на разработку метаданных, характеризующих опасные производственные факторы на строительных площадках, интегрированные в ИМ;

б) на отображение различных вариантов защитных (сигнальных) ограждений и знаков безопасности на строительных площадках для целей информирования работников;

с) на разработку баз данных зон потенциально опасных и постоянно действующих производственных факторов на строительных

площадках в соответствии с характером выполняемых работ;

д) на визуализацию зон, в которых постоянно действуют или могут действовать опасные факторы, связанные или не связанные с характером выполняемых работ.

К *инструментам*, используемым для реализации представленных способов можно отнести:

1. динамические библиотеки зон, в которых постоянно действуют или могут действовать опасные факторы, связанные или не связанные с характером выполняемых работ, интегрированные в ИМ;

2. независимо компилируемые программные модули, динамически подключаемые к программным комплексам для автоматизированного проектирования объектов строительства по визуализации зон, в которых постоянно действуют или могут действовать опасные факторы, связанные или не связанные с характером выполняемых работ;

3. динамические библиотеки метаданных, характеризующих опасные производственные факторы на строительных площадках, интегрированные в ИМ.

Анализируя результаты исследований, приведенных по *третьему* направлению, можно выделить характерные для данной области способы со следующими *целевыми направленностями*:

а) на отображение различных вариантов маршрутов перемещения для работников, учитывая возможные маршруты движения транспортных средств, работающих строительных машин и оборудования;

б) на использование технологии виртуальной реальности для информирования и обучения работников безопасным маршрутам перемещения по строительным площадкам с учетом зон постоянно действующих и потенциально опасных производственных факторов;

с) на разработку метаданных, характеризующих зоны постоянно действующих и потенциально опасных производственных факторов на работников в границах строительной площадки.

Следует обратить внимание на следующие *инструменты*, используемые для реализации представленных способов:

1. динамические библиотеки различных вариантов маршрутов перемещения для работников в границах строительной площадки, интегрированные в 4-D модель объекта строительства;

2. динамические библиотеки метаданных, характеризующие зоны постоянно действующих и потенциально опасных производственных факторов на работников в границах строительной площадки, интегрированные в 4-D модель объекта строительства.

Учитывая специфику исследований по *четвертой* группе, необходимо отметить следующие способы с *целевыми направленностями*,

которые наиболее конкретно отражают области применения результатов:

а) на идентификацию и анализ проектных решений по безопасности труда в части размещения на строительных площадках различных материалов, оборудования и транспортных средств при корректировке маршрутов перемещения работников по строительной площадке;

б) на интеграцию в ИМ средств визуализации траекторий движения машин, оборудования или их частей;

с) на интеграцию в ИМ баз данных полученных травм в соответствии с конкретной обстановкой в рабочей зоне на строительных площадках;

д) на интеграцию в ИМ программных модулей для генерации минимально допустимых требований к размещению оборудования на строительных площадках;

е) на отображении в ИМ пространственного положения работников посредством передачи информации с аппаратных передатчиков.

Следует обратить внимание на следующие *инструменты*, используемые для реализации представленных способов:

а) независимо компилируемые программные модули, динамически подключаемые к программным комплексам для автоматизированного проектирования объектов строительства для визуализации положения работников посредством обработки информации с аппаратных передатчиков;

б) динамические библиотеки полученных травм в соответствии с конкретной обстановкой в рабочей зоне на строительных площадках, интегрированные в ИМ;

с) программный модуль средств визуализации траекторий движения машин, оборудования или их частей и рабочих органов, интегрированный в ИМ.

К способам по *пятому* направлению исследований, характеризующихся следующими *целевыми направленностями*, можно отнести:

а) на отображение в ИМ точек размещения на строительных площадках приборов контроля предельно допустимых значений вредных производственных факторов;

б) на отслеживание маршрутов перемещения работников по строительной площадке в режиме реального времени с отображением метаданных в ИМ;

с) на визуализацию и прогнозирование маршрутов перемещения работников по строительной площадке с целью определения наиболее вероятных мест их пересечения, с зонами постоянно действующих опасных производственных факторов и отображением метаданных в ИМ.

Перечислим основные *инструменты*, используемые для реализации представленных способов:

1. динамические библиотеки метаданных точек размещения на строительных площадках

приборов контроля предельно допустимых значений вредных производственных факторов;

2. независимо компилируемые программные модули, динамически подключаемые к программным комплексам для автоматизированного проектирования объектов строительства по визуализации маршрутов перемещения работников по строительной площадке в режиме реального времени.

Способы, отнесенные к *шестому* направлению, имеют следующие *целевые направленности*:

а) на использование технологий дополненной реальности при демонстрации оптимальных мест расположения сигнальных ограждений и знаков безопасности, а также безопасных мест для эвакуации работников для случаев возникновения угрозы безопасности и их здоровью, отображающихся в ИМ;

б) на использование технологий виртуальной реальности, интегрированных в ИМ для обучения работников мероприятиям по безопасности производства работ.

Следует отметить тот факт, что использование ИМ повышает результативность применения на их базе различных баз данных и динамических библиотек, которые помогают идентифицировать различные профессиональные риски и выработать комплекс проектных решений для обеспечения безопасных условий работы при строительстве объектов. В том числе способствует более прозрачному обмену информацией между программными средствами, разработанными для расчетов параметров безопасности и цифровыми решениями по алгоритмам оценки условий труда. Перечисленные преимущества технологий, основанных на базах данных, значительно облегчат коммуникацию между специалистами по охране труда и будут способствовать большей детализации и корреляции профессиональных рисков с конкретными проектными решениями.

Интеграция баз данных аварийных ситуаций на строительных площадках в ИМ может значительно снизить количество прецедентов и травматизма за счет проведения превентивных мероприятий по устранению потенциально опасных источников получения травм для работников на строительных площадках. Вместе с тем возможность визуализации различных вариантов защитных (сигнальных) ограждений и знаков безопасности на строительных площадках при информировании работников о зонах, в которых могут воздействовать потенциально опасные производственные факторы, способствует их эффективному обучению и минимизации рисков получения травм и несчастных случаев.

Однако, ряд специалистов по охране труда считают, что применение ИМ для обеспечения безопасных условий труда для работников строительной отрасли осложняется постоянным изменением и совершенствованием (обновлением) программных продуктов, что в значительной степени экономически не эффективно по сравнению

с классическими методами организации охраны труда на строительных площадках [68]. При этом, обучение специалистов по охране труда, архитекторов и проектировщиков с особенностями работы с ИМ и интегрированными программными продуктами по обеспечению безопасных условий труда в строительстве, безусловно, является целесообразным.

ВЫВОДЫ

В настоящее время применение ИМ в целях интеграции различных цифровых решений в области охраны труда в строительстве является активно развивающимся направлением. Представленные исследования демонстрируют всесторонний охват проблематики в области охраны труда в строительстве и разнообразный перечень программно-аппаратных комплексов, интегрированных на базе ИМ. В качестве основных выводов, необходимо отметить следующие позиции:

1) применение ИМ для анализа и проектирования различных решений по обеспечению безопасности условий труда работников на строительных площадках позволяют отслеживать и производить их оценку на всех этапах жизненного цикла объекта строительства;

2) вопросы по обучению работников правилам охраны труда представлены применением технологий дополненной и виртуальной реальности, что способствует более наглядному представлению информации по основным опасным производственным факторам. Вместе с тем, такие направления как проверка знаний требований охраны труда, инструктажи по охране труда развиты не в полной степени и является перспективным направлением исследования;

3) анализ профессиональных рисков представлен различными базами данных и динамическими библиотеками, интегрированными в ИМ, однако оптимальных алгоритмов расчета количественных показателей профессиональных рисков для различных объектов строительства представлено недостаточно, что делает данное направление исследований актуальным для дальнейших исследований;

4) разработка независимо компилируемых программных модулей, динамически подключаемых к ИМ, способствует качественному мониторингу предельно допустимых значений вредных производственных факторов в режиме реального времени с использованием 4-D моделей. Одновременно с этим, появляется необходимость в разработке методов расчета и количественного обоснования мест расположения приборов контроля для реализации мониторинга на объектах строительства и последующим отображением метаданных в ИМ.

5) применение в ИМ элементов визуализации различных динамических траекторий и зон с применением разнообразных аппаратных средств

пространственной идентификации объектов (*GPS*, *RFID*-метки, *BLE*, *IPS*), открывает широкие возможности для исследований в области интеграции технологий ИМ в концепцию «*Industry 4.0*»;

Авторами, была предпринята попытка типологизировать актуальные исследования в области интеграции цифровых и аппаратно-программных решений в ИМ по вопросам охраны труда в строительстве. Цифровые технологии активно развиваются, программные комплексы для автоматизированного проектирования объектов строительства дополняются и функционально совершенствуются, поэтому результаты исследования являются отправной точкой при разработке направлений исследований в данной области. Результаты исследований дополняют и обобщают многочисленные исследования и разработки в области применения ИМ в области охраны труда в строительстве. Прикладная ценность исследования заключается в возможности непосредственного применения полученных результатов и выводов для работников, которые непосредственно заняты в сфере разработки и проектирования ИМ, а также для исследователей в области охраны труда в строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022)
2. Heinrich H. W. et al. Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach. Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach, 1941, Second Edition.
3. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости и ее территориальных органов в 2021 году
4. Marmo R. et. al. A methodology for a performance information model to support facility management. *Sustainability*, 2019, vol. 11, issue 24, Pp. 7007.
5. Verghote A. et. al. The effects of information format and spatial cognition on individual wayfinding performance. *Buildings*, 2019, vol. 9, issue 2, p. 29.
6. Dasović B., Galić M., Klanšek U. Active BIM approach to optimize work facilities and tower crane locations on construction sites with repetitive operations. *Buildings*, 2019, vol. 9, issue 1, Pp. 21.
7. Fargnoli M. et al. A BIM-based PSS approach for the management of maintenance operations of building equipment. *Buildings*, 2019, vol. 9, issue 6, p. 139.
8. Zhang S. et. al. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Automation in construction*, 2013, issue 29, Pp. 183-195.
9. Fargnoli M., Lombardi M. Building information modelling (BIM) to enhance occupational safety in construction activities: Research trends emerging from one decade of studies. *Buildings*, 2020, vol. 10, issue 6, Pp. 98.
10. Lasi H. et. al. Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 2014, issue 6, Pp. 239-242.
11. Badri A., Boudreau-Trudel B., Souissi A.S. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety science*, 2018, issue 109, Pp. 403-411.
12. Madsen D.Ø. The emergence and rise of Industry 4.0 viewed through the lens of management fashion theory. *Administrative Sciences*, 2019, vol. 9, issue 3, p. 71.
13. Ingemarsdotter, E.; Jamsin, E.; Kortuem, G.; Balkenende, R. Circular strategies enabled by the internet of things – a framework and analysis of current practice. *Sustainability* 2019, 11, 5689.
14. Maskuriy R. et.al. Industry 4.0 for the construction industry – how ready is the industry? *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, issue 14, p. 2819.; Sawhney A. et al. *Construction 4.0* //Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J., Eds. – 2020.
15. Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2nd ed.; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011
16. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 926/пр от 29.12.2014 г. «Об утверждении Плана поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства» / Электронный фонд «Техэксперт» – <http://docs.cntd.ru/document/420245345> (дата обращения 27.03.2020 г.)
17. Указ Президента РФ от 9.05.2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» / Информационно-правовой портал «Гарант» – <http://docs.cntd.ru/document/420245345> (дата обращения 27.03.2020 г.)
18. Yuan J. et. al. Accident prevention through design (PtD): Integration of building information modeling and PtD knowledge base //Automation in construction. – 2019. – issue 102. – С. 86-104.
19. Jin Z. et al. Using 4D BIM to assess construction risks during the design phase //Engineering, Construction and Architectural Management. – 2019.
20. Ding L. Y. et al. Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology. *Safety science*, 2016, issue 87, pp. 202-213.
21. Hossain M. A. et al. Design-for-safety knowledge library for BIM-integrated safety risk reviews. *Automation in Construction*, 2018, issue 94, pp. 290-302.
22. Шарманов В.В., Симанкина Т.Л., Мамаев А.Е., Контроль рисков строительства на основе BIM технологий, *Строительство уникальных зданий и сооружений*, 2017, №12(63). С.113-124.
23. Zou Y. et. al. Risk information management for bridges by integrating risk breakdown structure into 3D/4D BIM //KSCE journal of civil engineering. – 2019. – Т. 23. – Pp. 467-480.

24. Zhang L. et al. Bim-based risk identification system in tunnel construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, vol. 22, issue 4, Pp. 529-539.
25. Jeong G. et al. Analysis of safety risk factors of modular construction to identify accident trends // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. – 2022. – Т. 21. – №. 3. – С. 1040-1052.
26. Shen X., Marks E. Near-miss information visualization tool in BIM for construction safety. *Journal of construction engineering and management*, 2016, vol. 142, issue 4, p. 04015100.
27. Teo A. L. E. et al. Design for safety: theoretical framework of the safety aspect of BIM system to determine the safety index. *Construction Economics and Building*, 2016, vol. 16, issue 4, Pp. 1-18.
28. Lin E T.A. An intelligent system for determining productivity and safety index using building information modeling: a case study of IPASS in Singapore. *Research Companion to Building Information Modeling*. Edward Elgar Publishing, 2022, pp. 415-435.
29. Park, S.; Kim, I. Bim-based quality control for safety issues in the design and construction phases. *Archnet-Ijar* 2015, 9, 111–129.
30. Hossain, M.M.; Ahmed, S. Developing an automated safety checking system using BIM: A case study in the Bangladeshi construction industry. *Int. J. Constr. Manag.* 2019, 1-19.
31. Schwabe, K.; Teizer, J.; König, M. Applying rule – Based Model – checking to construction site layout planning tasks. *Autom. Constr.* 2019, 97, 205-219.
32. Zhang, S.; Boukamp, F.; Teizer, J. Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). *Autom. Constr.* 2015, 52, 29-41.
33. Malekitabar, H.; Ardeshir, A.; Sebt, M.H.; Stouffs, R. Construction safety risk drivers: A BIM approach. *Saf. Sci.* 2016, 82, 445-455
34. Li, M.; Yu, H.; Liu, P. An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM. *Autom. Constr.* 2018, 91, 284–292
35. Luo, H.; Gong, P. A BIM-based code compliance checking process of deep foundation construction plans. *J. Intell. Robot. Syst.* 2015, 79, 549–576
36. Khan, N.; Ali, A.K.; Skibniewski, M.J.; Lee, D.J.; Park, C. Excavation safety modeling approach using BIM and VPL. *Adv. Civ. Eng.* 2019, 15, 1515808.
37. Qi, J.; Issa, R.; Olbina, S.; Hinze, J. Use of building information modeling in design to prevent construction worker falls. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014, 28, A4014008.
38. Melzner, J.; Zhang, S.; Teizer, J.; Bargstädt, H. A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models. *Constr. Manag. Econ.* 2013, 31, 661-674.
39. Zhang, S.; Teizer, J.; Lee, J.; Eastman, C.M.; Venugopal, M. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Autom. Constr.* 2013, 29, 183-195.
40. Ji, Y.; Leite, F. Automated tower crane planning: Leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking. *Autom. Constr.* 2018, 93, 78-90.
41. Hara, T.; Shimomura, K.; Hamano, K.; Miyake, S. Automatic design, planning and drawing of scaffolding system for constructions. *Adv. Comput. Des.* 2019, 4, 179-196.
42. Kim, K.; Teizer, J. Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling. *Adv. Eng. Inf.* 2014, 28, 66–80.
43. Kim, J.; Fischer, M.; Kunz, J.; Levitt, R. Semiautomated scaffolding planning: Development of the feature lexicon for computer application. *J. Comput. Civ. Eng.* 2015, 29, 04014079.
44. Kim, K.; Cho, Y.K.; Zhang, S. Integrating work sequences and temporary structures into safety planning: Automated scaffolding-related safety hazard identification and prevention in BIM. *Autom. Constr.* 2016, 70, 128-142.
45. Kim, K.; Cho, Y.K.; Kim, K. BIM-Based Decision-Making Framework for Scaffolding Planning. *J. Manag. Eng.* 2018, 34, 4018046.
46. Kim, K.; Cho, Y.; Kim, K. BIM-Driven Automated Decision Support System for Safety Planning of Temporary Structures. *J. Constr. Eng. Manag.* 2018, 144, 4018072.
47. Moon, H.; Kim, H.; Kim, C.; Kang, L. Development of a schedule-workspace interference management system simultaneously considering the overlap level of parallel schedules and workspaces. *Autom. Constr.* 2014, 39, 93-105.
48. Moon, H.; Dawood, N.; Kang, L. Development of workspace conflict visualization system using 4D object of work schedule. *Adv. Eng. Inf.* 2014, 28, 50-65.
49. Xie H., Shi W., Issa R. R. A. Using RFID and real-time virtual reality simulation for optimization in steel construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2011, vol. 16, issue 19, pp. 291-308.
50. Tixier, A.J.-P.; Hallowell, M.R.; Rajagopalan, B.; Bowman, D. Construction safety clash detection: Identifying safety incompatibilities among fundamental attributes using data mining. *Autom. Constr.* 2017, 74, 39-54.
51. Zhang, J.; Hu, Z. BIM-and 4d-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Principles and methodologies. *Autom. Constr.* 2011, 20, 155-166.
52. Hu, Z.; Zhang, J. BIM-and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 2. Development and site trials. *Autom. Construct.* 2011, 20, 167-180
53. Arslan, M.; Cruz, C.; Ginhac, D. Semantic enrichment of spatio-temporal trajectories for worker safety on construction sites. *Pers. Ubiquitous Comput.* 2019, 23, 749–764.

REFERENCES

54. Zhang, S.; Teizer, J.; Pradhananga, N.; Eastman, C.M. Workforce location tracking to model, visualize and analyze workspace requirements in building information models for construction safety planning. *Autom. Constr.* 2015, 60, 74-86.
55. Yi, S.L.; Zhang, X.; Calvo, M.H. Construction safety management of building project based on BIM. *J. Mech. Eng. Res. Dev.* 2015, 38, 97-104.
56. Lee, G.; Cho, J.; Ham, S.; Lee, T.; Lee, G.; Yun, S.H.; Yang, H.J. A BIM-and sensor-based tower crane navigation system for blind lifts. *Autom. Constr.* 2012, 26, 1-10.
57. Riaz, Z.; Arslan, M.; Kiani, A.K.; Azhar, S. CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces. *Autom. Constr.* 2014, 45, 96-106.
58. Riaz, Z.; Edwards, D.J.; Parn, E.A.; Shen, C.; Pena-Mora, F. BIM and sensor-based data management system for construction safety monitoring. *J. Eng. Des. Technol.* 2017, 15, 738-753.
59. Arslan, M.; Riaz, Z.; Kiani, A.K. Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction H&S management. *Electron. J. Inf. Tech. Constr.* 2014, 19, 72-91.
60. Costin, A.; Teizer, J.; Schoner, B. RFID and BIM-Enabled worker location tracking to support real-time Building protocol control and data visualization on a large hospital project. *J. Inf. Technol. Constr. (ITcon.)* 2015, 40, 495-517.
61. Arslan, M.; Cruz, C.; Ginjac, D. Semantic trajectory insights for worker safety in dynamic environments. *Autom. Constr.* 2019, 106, 102854.
62. Tagliabue, L.C.; Ciribini, A.L.C. A BIM Based IoT Approach to the Construction Site Management. *In_bo* 2018, 9, 136-145.
63. Li, M.; Yu, H.; Jin, H.; Liu, P. Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM. *Saf. Sci.* 2018, 110, 418-426.
64. Park, J.; Kim, K.; Cho, Y. Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors. *J. Constr. Eng. Manag.* 2017, 143, 05016019.
65. Golovina, O.; Teizer, J.; Pradhananga, N. Heat map generation for predictive safety planning: Preventing struck-by and near miss interactions between workers-on-foot and construction equipment. *Autom. Constr.* 2016, 71, 99-115.
66. Park, C.-S.; Kim, H.-J. A framework for construction safety management and visualization system. *Autom. Constr.* 2013, 33, 95-103.
67. Getuli, V.; Giusti, T.; Capone, P.; Sorbi, T.; Bruttini, A. A Project Framework to Introduce Virtual Reality in Construction Health and Safety. *In_bo* 2018, 9, 166-175.
68. Alomari, K.; Gambatese, J.; Anderson, J. Opportunities for using Building Information Modeling to improve worker safety performance. *Safety* 2017, 3, 7.
1. «Labor Code of the Russian Federation» dated December 30, 2001 N 197-FZ (as amended on December 19, 2022). (In Russian)
2. Heinrich H. W. et. al. *Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach. Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach, 1941, Second Edition.*
3. Report on the activities of the Federal Service for Labor and Employment and its territorial bodies in 2021. (In Russian)
4. Marmo R. et. al. A methodology for a performance information model to support facility management. *Sustainability*, 2019, vol. 11, issue 24, Pp. 7007.
5. Verghote A. et. al. The effects of information format and spatial cognition on individual wayfinding performance. *Buildings*, 2019, vol. 9, issue 2, Pp. 29.
6. Dasović B., Galić M., Klanšek U. Active BIM approach to optimize work facilities and tower crane locations on construction sites with repetitive operations. *Buildings*, 2019, vol. 9, issue 1, Pp. 21.
7. Fargnoli M. et al. A BIM-based PSS approach for the management of maintenance operations of building equipment. *Buildings*, 2019, vol. 9, issue 6, Pp. 139.
8. Zhang S. et. al. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Automation in construction*, 2013, issue 29, pp. 183-195.
9. Fargnoli M., Lombardi M. Building information modelling (BIM) to enhance occupational safety in construction activities: Research trends emerging from one decade of studies. *Buildings*, 2020, vol. 10, issue 6, Pp. 98.
10. Lasi H. et. al. *Industry 4.0. Business & information systems engineering*, 2014, issue 6, Pp. 239-242.
11. Badri A., Boudreau-Trudel B., Souissi A. S. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety science*, 2018, issue 109, Pp. 403-411.
12. Madsen D. Ø. The emergence and rise of Industry 4.0 viewed through the lens of management fashion theory. *Administrative Sciences*, 2019, vol. 9, issue 3, p. 71.
13. Ingemarsdotter, E.; Jamsin, E.; Kortuem, G.; Balkenende, R. Circular strategies enabled by the internet of things – A framework and analysis of current practice. *Sustainability* 2019, 11, 5689.
14. Maskuriy R. et al. Industry 4.0 for the construction industry – how ready is the industry? *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, issue 14, p. 2819.; Sawhney A. et al. *Construction 4.0 // Sawhney, A., Riley, M., Irizarry, J., Eds. – 2020.*
15. Eastman, C.; Teicholz, P.; Sacks, R.; Liston, K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2nd ed.; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011
16. Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 926/pr dated December 29, 2014 “On

- approval of the Plan for the phased introduction of information modeling technologies in the field of industrial and civil construction” / *Techexpert Electronic Fund* – <http://docs.cntd.ru/document/420245345> (accessed 03.27.2020). (In Russian)
17. Decree of the President of the Russian Federation of May 9, 2017 No. 203 “On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030” / *Information and legal portal “Garant”* – <http://docs.cntd.ru/document/420245345> (date appeals 27.03.2020). (In Russian)
18. Yuan J. et al. Accident prevention through design (PtD): Integration of building information modeling and PtD knowledge base // *Automation in construction*. – 2019. – issue 102. – C. 86-104.
19. Jin Z. et al. Using 4D BIM to assess construction risks during the design phase // *Engineering, Construction and Architectural Management*. – 2019.
20. Ding L. Y. et al. Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology. *Safety science*, 2016, issue 87, Pp. 202-213.
21. Hossain M. A. et al. Design-for-safety knowledge library for BIM-integrated safety risk reviews. *Automation in Construction*, 2018, issue 94, Pp. 290-302.
22. Sharmanov V.V., Simankina T.L., Mamaev A.E., Control of construction risks based on BIM technologies, *Construction of unique buildings and structures*, 2017, No. 12(63). Pp.113-124. (In Russian)
23. Zou Y. et. al. Risk information management for bridges by integrating risk breakdown structure into 3D/4D BIM // *KSCE journal of civil engineering*. – 2019. – T. 23. – Pp. 467-480.
24. Zhang L. et al. Bim-based risk identification system in tunnel construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, vol. 22, issue 4, Pp. 529-539.
25. Jeong G. et. al. Analysis of safety risk factors of modular construction to identify accident trends // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. – 2022. – T. 21. – №. 3. – Pp. 1040-1052.
26. Shen X., Marks E. Near-miss information visualization tool in BIM for construction safety. *Journal of construction engineering and management*, 2016, vol. 142, issue 4, p. 04015100.
27. Teo A. L. E. et al. Design for safety: theoretical framework of the safety aspect of BIM system to determine the safety index. *Construction Economics and Building*, 2016, vol. 16, issue 4, pp. 1-18.
28. Lin E.T.A. An intelligent system for determining productivity and safety index using building information modeling: a case study of IPASS in Singapore. *Research Companion to Building Information Modeling*. Edward Elgar Publishing, 2022, Pp. 415-435.
29. Park, S.; Kim, I. Bim-based quality control for safety issues in the design and construction phases. *Archnet-Ijar* 2015, 9, 111-129.
30. Hossain, M.M.; Ahmed, S. Developing an automated safety checking system using BIM: A case study in the Bangladeshi construction industry. *Int. J. Constr. Manag.* 2019, 1-19.
31. Schwabe, K.; Teizer, J.; König, M. Applying rule – Based Model – checking to construction site layout planning tasks. *Autom. Constr.* 2019, 97, 205-219.
32. Zhang, S.; Boukamp, F.; Teizer, J. Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). *Autom. Constr.* 2015, 52, 29-41.
33. Malekitabar, H.; Ardeshir, A.; Sebt, M.H.; Stouffs, R. Construction safety risk drivers: A BIM approach. *Saf. Sci.* 2016, 82, 445-455
34. Li, M.; Yu, H.; Liu, P. An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM. *Autom. Constr.* 2018, 91, 284-292
35. Luo, H.; Gong, P. A BIM-based code compliance checking process of deep foundation construction plans. *J. Intell. Robot. Syst.* 2015, 79, 549-576
36. Khan, N.; Ali, A.K.; Skibniewski, M.J.; Lee, D.J.; Park, C. Excavation safety modeling approach using BIM and VPL. *Adv. Civ. Eng.* 2019, 15, 1515808.
37. Qi, J.; Issa, R.; Olbina, S.; Hinze, J. Use of building information modeling in design to prevent construction worker falls. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014, 28, A4014008.
38. Melzner, J.; Zhang, S.; Teizer, J.; Bargstädt, H. A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models. *Constr. Manag. Econ.* 2013, 31, 661-674.
39. Zhang, S.; Teizer, J.; Lee, J.; Eastman, C.M.; Venugopal, M. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Autom. Constr.* 2013, 29, 183-195.
40. Ji, Y.; Leite, F. Automated tower crane planning: Leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking. *Autom. Constr.* 2018, 93, 78-90.
41. Hara, T.; Shimomura, K.; Hamano, K.; Miyake, S. Automatic design, planning and drawing of scaffolding system for constructions. *Adv. Comput. Des.* 2019, 4, 179-196.
42. Kim, K.; Teizer, J. Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling. *Adv. Eng. Inf.* 2014, 28, 66-80.
43. Kim, J.; Fischer, M.; Kunz, J.; Levitt, R. Semiautomated scaffolding planning: Development of the feature lexicon for computer application. *J. Comput. Civ. Eng.* 2015, 29, 04014079.
44. Kim, K.; Cho, Y.K.; Zhang, S. Integrating work sequences and temporary structures into safety planning: Automated scaffolding-related safety hazard identification and prevention in BIM. *Autom. Constr.* 2016, 70, 128-142.
45. Kim, K.; Cho, Y.K.; Kim, K. BIM-Based Decision-Making Framework for Scaffolding Planning. *J. Manag. Eng.* 2018, 34, 4018046.
46. Kim, K.; Cho, Y.; Kim, K. BIM-Driven Automated Decision Support System for Safety

Planning of Temporary Structures. *J. Constr. Eng. Manag.* 2018, 144, 4018072.

47. Moon, H.; Kim, H.; Kim, C.; Kang, L. Development of a schedule-workspace interference management system simultaneously considering the overlap level of parallel schedules and workspaces. *Autom. Constr.* 2014, 39, 93-105.

48. Moon, H.; Dawood, N.; Kang, L. Development of workspace conflict visualization system using 4D object of work schedule. *Adv. Eng. Inf.* 2014, 28, 50-65.

49. Xie H., Shi W., Issa R. R. A. Using RFID and real-time virtual reality simulation for optimization in steel construction. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2011, vol. 16, issue 19, Pp. 291-308.

50. Tixier, A.J.-P.; Hallowell, M.R.; Rajagopalan, B.; Bowman, D. Construction safety clash detection: Identifying safety incompatibilities among fundamental attributes using data mining. *Autom. Constr.* 2017, 74, 39-54.

51. Zhang, J.; Hu, Z. BIM-and 4d-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Principles and methodologies. *Autom. Constr.* 2011, 20, 155-166.

52. Hu, Z.; Zhang, J. BIM-and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 2. Development and site trials. *Autom. Construct.* 2011, 20, 167-180

53. Arslan, M.; Cruz, C.; Ginhac, D. Semantic enrichment of spatio-temporal trajectories for worker safety on construction sites. *Pers. Ubiquitous Comput.* 2019, 23, 749-764.

54. Zhang, S.; Teizer, J.; Pradhananga, N.; Eastman, C.M. Workforce location tracking to model, visualize and analyze workspace requirements in building information models for construction safety planning. *Autom. Constr.* 2015, 60, 74-86.

55. Yi, S.L.; Zhang, X.; Calvo, M.H. Construction safety management of building project based on BIM. *J. Mech. Eng. Res. Dev.* 2015, 38, 97-104.

56. Lee, G.; Cho, J.; Ham, S.; Lee, T.; Lee, G.; Yun, S.H.; Yang, H.J. A BIM-and sensor-based tower crane navigation system for blind lifts. *Autom. Constr.* 2012, 26, 1-10.

57. Riaz, Z.; Arslan, M.; Kiani, A.K.; Azhar, S. CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces. *Autom. Constr.* 2014, 45, 96-106.

58. Riaz, Z.; Edwards, D.J.; Parn, E.A.; Shen, C.; Pena-Mora, F. BIM and sensor-based data management system for construction safety monitoring. *J. Eng. Des. Technol.* 2017, 15, 738-753.

59. Arslan, M.; Riaz, Z.; Kiani, A.K. Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction H&S management. *Electron. J. Inf. Tech. Constr.* 2014, 19, 72-91.

60. Costin, A.; Teizer, J.; Schoner, B. RFID and BIM-Enabled worker location tracking to support real-time Building protocol control and data visualization on a large hospital project. *J. Inf. Technol. Constr. (ITcon.)* 2015, 40, 495-517.

61. Arslan, M.; Cruz, C.; Ginhac, D. Semantic trajectory insights for worker safety in dynamic environments. *Autom. Constr.* 2019, 106, 102854.

62. Tagliabue, L.C.; Ciribini, A.L.C. A BIM Based IoT Approach to the Construction Site Management. *In_bo* 2018, 9, 136-145.

63. Li, M.; Yu, H.; Jin, H.; Liu, P. Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM. *Saf. Sci.* 2018, 110, 418-426.

64. Park, J.; Kim, K.; Cho, Y. Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors. *J. Constr. Eng. Manag.* 2017, 143, 05016019.

65. Golovina, O.; Teizer, J.; Pradhananga, N. Heat map generation for predictive safety planning: Preventing struck-by and near miss interactions between workers-on-foot and construction equipment. *Autom. Constr.* 2016, 71, 99-115.

66. Park, C.-S.; Kim, H.-J. A framework for construction safety management and visualization system. *Autom. Constr.* 2013, 33, 95-103.

67. Getuli, V.; Giusti, T.; Capone, P.; Sorbi, T.; Bruttini, A. A Project Framework to Introduce Virtual Reality in Construction Health and Safety. *In_bo* 2018, 9, 166-175.

68. Alomari, K.; Gambatese, J.; Anderson, J. Opportunities for using Building Information Modeling to improve worker safety performance. *Safety* 2017, 3, 7.

SYSTEMATIZATION OF DIGITAL SOLUTIONS TO SECURE LABOUR SAFETY CONDITIONS
BASED ON INFORMATION MODELS OF BUILDINGFedosov¹ S.V., Korol¹ E.A., Bakanov² M.O.¹ Moscow State University of Civil Engineering, fedosovsv@mgsu.ru, KorolEA@mgsu.ru² Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, mask-13@mail.ru

Abstract. A key issue in modern construction is to ensure safe working conditions for workers on construction sites. Directions for improving the construction industry contribute to the expansion of scientific and applied research in the field of ensuring safe working conditions for workers and the introduction of new forms and methods in order to comprehensively cover tools that promote the use of various digital technologies in the field of labor protection in construction. The active transition of the industrial and civil construction industry to a higher level of competitiveness in many countries of the world is associated with the creation of building information models (BIM). The work carried out an analysis by comparing the implementation of various digital tools in BIM, which are aimed at ensuring safe working conditions in construction. The totality of research areas is typified in the following areas, which specify the specifics of the areas of application of technologies and methods of organizing labor protection in construction: occupational risk management; assessment of working conditions; visualization of production operations and methods; modeling of production sites; prevention of industrial injuries; training in labor protection rules. Based on the results obtained, the advantages and disadvantages of digital tools used to ensure safe working conditions based on BIM were identified. The indicators of industrial injuries and accidents and their causes have been studied. The above analytics indicates that the construction industry, in terms of the number of deaths at work, has high rates on a par with the manufacturing industry, which demonstrates the need to search for modern methods of organizing and monitoring safety and labor protection conditions in construction. It is shown that the regulatory legal and regulatory framework for the introduction of information modeling technologies is actively developing, which creates the basis for the implementation of practical tasks in the design and operation of buildings at all stages of the life cycle of an object. The target directions of the methods within the boundaries of the designated areas of research on the introduction of digital tools in BIM are determined, the main technologies and methods for implementing the proposed tools are indicated.

Subject of study: digital tools used for BIM as a set of technologies that provide organization, analysis and assessment of safe working conditions in construction.

Materials and methods: When determining the development trends of BIM-technologies in the context of ensuring safe working conditions in construction, we analyzed the use of these technologies in the following conceptual areas: management of construction production and labor protection; 4-D planning of work and schedules of production tasks; visualization and/or simulation; interaction and communications; determination of harmful factors of production. The analysis identified the advantages and disadvantages of using information modeling in the context of improving the organization of labor protection in construction for each of the conceptual directions for the development of BIM technologies. Based on the analysis of normative legal acts and normative and technical documentation, a set of sources is determined, showing the dynamics of development and implementation of information modeling of capital construction projects in Russia.

Results: It should be noted that the use of BIM increases the effectiveness of using various databases and dynamic libraries based on them, which help to identify various occupational risks and develop a set of design solutions to ensure safe working conditions during the construction of facilities. Among other things, it contributes to a more transparent exchange of information between software tools developed for calculating safety parameters and digital solutions for algorithms for assessing working conditions. The listed advantages of database-based technologies will greatly facilitate communication between occupational safety specialists and will contribute to greater detail and correlation of occupational risks with specific design solutions. Integrating construction site accident databases into BIM can significantly reduce the number of incidents and injuries by taking preventive measures to eliminate potentially dangerous sources of injury for workers on construction sites. At the same time, the possibility of visualizing various options for protective (signal) fencing and safety signs at construction sites, while informing workers about areas where potentially hazardous production factors can affect, contributes to their effective training and minimization of the risks of injury and accidents. However, a number of labor protection specialists believe that the use of BIM to ensure safe working conditions for workers in the construction industry is complicated by the constant change and improvement (updating) of software products, which is largely not cost-effective compared to classical methods of organizing labor protection at construction sites. . At the same time, the training of labor protection specialists, architects and designers with the peculiarities of working with BIM and integrated software products to ensure safe working conditions in construction is certainly appropriate.

Conclusions: The authors made an attempt to typify current research in the field of integration of digital and hardware-software solutions into BIM on issues of labor protection in construction. Digital technologies are actively developing, software systems for computer-aided design of construction objects are being supplemented and functionally improved, so the results of the study are the starting point for developing research directions in this area. The results of the research complement and summarize numerous studies and developments in the field of BIM application in the field of labor protection in construction. The applied value of the study lies in the possibility of direct application of the obtained results and conclusions for workers who are directly involved in the development and design of BIM, as well as for researchers in the field of labor protection in construction.

Key words: information model of a construction site, digital solution, labor protection in construction, safe working conditions, injuries, accident.