

УДК 614.8

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕРЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Пичугин Леонид Михайлович¹, Лавров Валерий Юрьевич, Шабанова Светлана Владимировна²,
Абрамов Александр Дмитриевич

¹ СИНЕРГИЯ, г. Москва, Российская Федерация

² РОСБИОТЕХ, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В условиях стремительного развития технологических процессов, роста производственной сложности и усиления требований к промышленной безопасности особую актуальность приобретает внедрение инновационных мер противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях. Настоящая статья посвящена анализу современных подходов к обеспечению безопасности, сформировавшихся в период 2020–2025 гг. в рамках концепции «Безопасность 4.0». Рассмотрены ключевые направления инноваций, среди которых особое внимание уделено применению систем прогнозной аналитики на основе искусственного интеллекта и машинного обучения для раннего выявления предаварийных состояний, широкому использованию интернета вещей для непрерывного мониторинга критически важных параметров производственной среды, разработке и применению цифровых двойников технологических процессов для моделирования сценариев развития аварийных ситуаций и поддержки оперативного принятия решений. Подробно проанализированы возможности виртуальной и дополненной реальности в процессе подготовки персонала к действиям в условиях аварий и катастроф, а также описано использование носимых электронных устройств для контроля состояния работников и окружающей среды в режиме реального времени. Отдельное внимание уделено перспективам применения робототехнических комплексов и беспилотных летательных аппаратов для реагирования на аварийные ситуации в условиях, опасных для человека. Приведены примеры успешного внедрения указанных технологий в зарубежной и российской практике, что позволяет сделать вывод о глобальной тенденции перехода от реактивного к проактивному управлению промышленной безопасностью. Отмечены основные вызовы на пути интеграции инновационных решений, включая необходимость обеспечения кибербезопасности, совершенствования нормативной правовой базы, стандартизации данных и подготовки высококвалифицированного персонала нового типа (Оператор 4.0). Статья направлена на формирование целостного представления о современном состоянии и перспективах развития системы противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях с использованием цифровых и интеллектуальных технологий, демонстрируя важность комплексного междисциплинарного подхода к решению задач обеспечения безопасности в условиях цифровизации промышленности.

Ключевые слова: интернет вещей, искусственный интеллект, носимые устройства, обучение в виртуальной реальности, прогнозирование аварий, промышленная безопасность, робототехнические системы, цифровизация безопасности, цифровой двойник, чрезвычайные ситуации

Для цитирования: Инновационные меры противодействия чрезвычайным ситуациям на предприятиях / Л. М. Пичугин [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 109–120.

INNOVATIVE MEASURES TO COUNTERACT EMERGENCIES AT ENTERPRISES

Leonid M. Pichugin¹, Valery Yu. Lavrov, Svetlana V. Shabanova², Alexander D. Abramov

¹ Synergy, Moscow, Russian Federation

² ROSBIOTEC'H University, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the context of the rapid development of technological processes, increasing production complexity, and tightening industrial safety requirements, the implementation of innovative measures to counteract emergencies at enterprises is becoming increasingly relevant. This article is devoted to the analysis of modern approaches to ensuring safety, developed between 2020 and 2025 within the framework of the "Safety 4.0" concept. The key areas of innovation are considered, with particular attention given to the application of predictive analytics systems based on artificial intelligence and machine learning for early detection of pre-emergency conditions, the widespread use of the Internet of Things for continuous monitoring of critical parameters of the production environment, and the development and implementation of digital twins of technological processes for simulating emergency development scenarios and supporting operational decision-making. The potential of virtual and augmented reality technologies in personnel training for actions in emergency conditions is thoroughly analyzed, as well as the use of wearable electronic devices for real-time monitoring of workers' conditions and environmental parameters. Special attention is paid to the prospects of using robotic systems and unmanned aerial vehicles for emergency response operations in hazardous environments. Examples of the successful implementation of these technologies in both foreign and Russian practices are provided, leading to the conclusion of a global trend toward the transition from reactive to proactive industrial safety management. Major challenges in integrating innovative solutions are noted, including the need to ensure cybersecurity, improve the regulatory framework, standardize data, and train highly qualified personnel of a new type (Operator 4.0). This article aims to provide a comprehensive understanding of the current state and development prospects of the emergency counteraction system at enterprises using digital and intelligent technologies, demonstrating the importance of a comprehensive interdisciplinary approach to solving safety challenges in the era of industrial digitalization.

Keywords: internet of things, wearable devices, training in virtual reality, accident-forecasting, industrial safety, robotic systems, digital safety transformation, artificial intelligence digital twin, emergency situations

Введение

Чрезвычайные ситуации (далее — ЧС) на промышленных предприятиях способны приводить к значительным человеческим жертвам, материальным убыткам и экологическому ущербу. Производственные аварии и несчастные случаи не только вызывают прямые потери, но и ведут к длительным остановкам производства, штрафным санкциям со стороны надзорных органов, утрате деловой репутации предприятия и другим косвенным издержкам. По оценкам современных исследований, травматизм и смертность на рабочих местах влекут за собой значимые финансовые потери и управленческие кризисы на предприятиях. В этой связи обеспечение промышленной безопасности и готовности к ЧС является одной из приоритетных задач современной индустрии.

Традиционные методы безопасности (регламентный контроль оборудования, обучение персонала по инструкциям, плановые проверки) сегодня дополняются инновационными мерами, основанными на достижениях науки и техники. С развитием концепции «Индустрия 4.0» сформировался и новый подход «Безопасность 4.0», предполагающий активное использование цифровых технологий для предотвращения аварий и смягчения последствий ЧС. Концепция «Безопасность 4.0» нацелена на предотвращение инцидентов за счет интеграции в систему управления безопасностью таких технологий, как искусственный интеллект, интернет вещей, киберфизические системы, большие данные и др.

Цифровые технологии прогнозирования и предотвращения аварий

Одним из важнейших направлений инноваций в сфере промышленной безопасности стало прогнозирование аварийных ситуаций с помощью цифровых технологий. Современные предприятия все чаще внедряют системы раннего обнаружения отклонений в технологических процессах, основанные на анализе больших данных и применении методов искусственного интеллекта. Такие системы мониторят параметры оборудования в реальном времени и способны распознавать предаварийные состояния еще до того, как произойдет отказ или авария. Это позволяет заблаговременно принять меры, например, скорректировать режим работы оборудования или вывести его в безопасное состояние, тем самым предотвратить развитие аварии.

Искусственный интеллект (далее — ИИ) и машинное обучение играют центральную роль в подобных решениях. Алгоритмы машинного обучения могут выявлять аномалии в поведении оборудования на основе потоков датчиков, предсказывая потенциальные неисправности. Согласно современным исследованиям, внедрение ИИ в систему промышленной безопасности позволяет перейти от реагирования на уже случившиеся инциденты к проактивному управлению рисками. Например, методы глубокого обучения успешно применяются для анализа изображений с камер и распознавания опасных ситуаций (утечки, возгорания, отсутствие защитной каски на работнике и т. д.) в режиме

реального времени. Такие интеллектуальные системы существенно снижают вероятность аварий за счет своевременного выявления опасных факторов.

Примером практического внедрения ИИ-технологий служит разработка отечественных ученых для нефтегазовой отрасли. А. Н. Дмитриевский с соавторами предложили автоматизированную систему предупреждения осложнений и аварий при бурении нефтяных скважин на основе методов машинного обучения и нейросетевого анализа данных бурения [1]. Эта система обрабатывает большой объем геолого-технологической информации в реальном времени и способна прогнозировать наступление аварийных осложнений (например, прихват бурильного инструмента, газовый выброс) с целью их предотвращения. По данным авторов, крупные нефтегазовые компании РФ уже переходят к использованию подобных цифровых технологий при бурении скважин, что выступает инновационным драйвером повышения безопасности и эффективности добычи нефти [1]. Таким образом, использование искусственного интеллекта для прогнозирования аварий — яркий пример инновационной меры, объединяющей зарубежные достижения (алгоритмы машинного обучения, развитые в 2020-х гг.) и отечественную практику (адаптация этих алгоритмов к задачам нефтегазового комплекса России).

Помимо ИИ, важным компонентом цифровой трансформации безопасности стали системы класса «интернет вещей» (далее — IoT) — сети датчиков, измеряющих критические параметры в цехах и на оборудовании. Снижение стоимости и размеров сенсоров позволило широко оснащать промышленное оборудование датчиками

вибрации, температуры, давления, газового состава и т. д. Эти датчики непрерывно передают данные в единые центры мониторинга. На основе их показаний интеллектуальные алгоритмы способны обнаружить ранние признаки развития нештатной ситуации, например, утечку опасного газа, перегрев узла или отклонение вибрации от нормы, и мгновенно оповестить службу безопасности предприятия. Таким образом достигается раннее предупреждение ЧС. Зарубежные промышленно развитые страны уже накопили большой опыт по внедрению подобных систем мониторинга на основе IoT, позволяющих в режиме реального времени отслеживать состояние производственных объектов и автоматически запускать протоколы реагирования при обнаружении отклонений [2].

Перспективной технологией, расширяющей возможности анализа данных от IoT, является концепция цифрового двойника. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального технического объекта или процесса, синхронизированную с ним по данным датчиков. В рамках безопасности такая модель применяется для оценки развития аварийной ситуации и отработки мер противодействия ей. Отмечается, что цифровые двойники уже используются для анализа рисков и поддержки принятия решений при ЧС, обеспечивая имитацию сценариев аварий в реальном времени [3]. Например, система цифрового двойника может на основе текущих параметров предсказывать поведение установки при развитии аварии (распространение пламени, рост давления и т. д.) и подсказывать операторам оптимальные действия по локализации инцидента. Кроме того, цифровой двойник позволяет заранее тестировать эффектив-

ность различных мер защиты в виртуальной среде, не подвергая риску само оборудование. По данным обзора E. Zio и L. Miqueles (2024 г.), применение технологии «цифровой двойник» для целей безопасности демонстрирует многообещающие результаты в самых разных отраслях — от энергетики до авиакосмической — однако требует решения ряда вопросов, включая обеспечение кибербезопасности и достоверности моделей [3].

В России концепция цифровых двойников также находит применение для повышения промышленной безопасности. Например, на крупных нефтехимических и металлургических предприятиях создаются комплексные виртуальные модели технологических линий, позволяющие моделировать аварийные ситуации (разгерметизацию, взрыв) и тренировать персонал действиям по их ликвидации без воздействия на реальное производство. Такие проекты находятся на стыке с системами тренажеров и будут рассмотрены ниже.

Отдельно следует упомянуть инновационные системы поддержки принятия решений (далее — СППР) для диспетчерских и оперативных служб предприятий. Они интегрируют упомянутые выше технологии: прогнозную аналитику, данные IoT и результаты моделирования, чтобы помочь человеку-оператору правильно оценить обстановку и выбрать оптимальные меры реагирования на зарождающуюся ЧС. К примеру, Д. В. Немчинов и др. разработали СППР для управления предаварийными ситуациями на установке каталитического риформинга нефтеперерабатывающего завода [1]. Система анализирует показатели технологического процесса и в случае отклонений рекомендует оператору конкретные шаги (сниже-

ние температуры реактора, переключение потоков и пр.) для предотвращения аварии. Подобные решения относятся к классу предупредительных мер — они не заменяют оператора, но значительно повышают оперативность и обоснованность его действий в стрессовых ситуациях.

Структурная интеграция новых систем в существующую инфраструктуру предприятия — важный практический аспект. Инновационные подсистемы (прогнозные модули, СППР) должны взаимодействовать с традиционными системами контроля (SCADA, системы противоаварийной защиты) и персоналом. Например, на рисунке представлена схема интеграции внешней системы предупреждения аварий (далее — СПАС) в общую систему управления технологическим процессом предприятия. Такая СПАС получает данные от первичных датчиков и SCADA, анализирует их с помощью ситуационной математической модели и передает оператору сигналы предупреждения или рекомендации по предотвращению аварии. При этом система работает параллельно с штатной автоматикой (сигнализацией, противоаварийной защитой), не нарушая ее функций [4].

На рисунке показано, что блок СПАС обменивается данными с существующей SCADA-системой и получает информацию от датчиков (первичных измерительных преобразователей), установленных на технологическом оборудовании. Аналитический модуль СПАС отслеживает тенденции изменения параметров и выявляет предаварийные ситуации. В случае обнаружения опасной тенденции СПАС может оповестить оператора (через рабочую станцию АСУТП) о необходимости вмешательства либо напрямую послать корректирующее воздействие

в систему управления. Оператор, в свою очередь, взаимодействует как с основной системой управления, так и с подсказками СПАС, получая двойной контур контроля над ситуацией. Практическая реализация подобной схемы была выполнена в Астраханском техническом университете (2022 г.) при создании опытного образца СПАС для опасных технологических объектов [4]. Испытания показали, что использование системы, способной прогнозировать развитие аварийного режима и предотвращать аварийную остановку оборудования, повышает безопасность и устойчивость функционирования опасных производственных объектов. Данный пример демонстрирует эффективность интеграции инновационной СППР в существующие контуры управления предприятием.

В заключение раздела следует отметить, что цифровые технологии прогнозирования аварий сегодня проходят этап активного внедрения. Зарубежные компании-пионеры (в сфере нефти и газа, химического производства, энергетики) уже отчитываются о снижении числа инцидентов после установки систем предиктивной аналитики и цифровых двойников. В России также реализуется ряд программ цифровизации промышленной безопасности на крупных предприятиях при поддержке государственных инициатив по переходу к «цифровой экономике». Обмен передовым опытом и адаптация лучших зарубежных практик (ИИ-аналитика, «цифровой двойник») к российским условиям играют важную роль в повышении уровня защищенности отечественных производств.

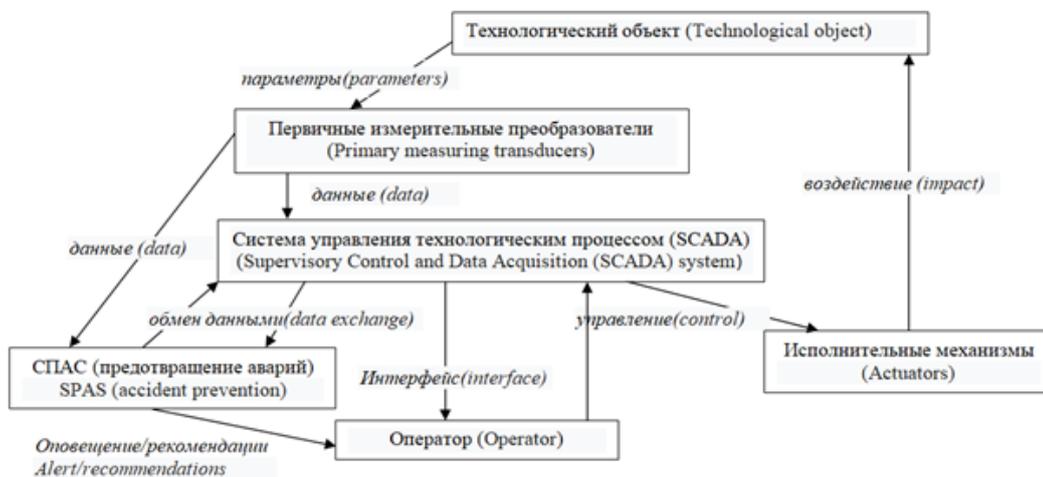


Рис. Структурная схема интеграции системы предупреждения аварий (СПАС) в автоматизированную систему управления технологическим процессом предприятия

Fig. Structural diagram of the integration of the accident prevention system (SPAS) into the automated process control system of the enterprise

Технологии подготовки персонала и реагирования на чрезвычайные ситуации

Также крупным направлением инноваций в области противодействия ЧС на предприятиях является внедрение технологий, повышающих готовность персонала к авариям и эффективность аварийно-спасательных

работ. Сюда относятся новые средства обучения и тренировки работников, а также современные технические решения для непосредственного реагирования в условиях ЧС.

Виртуальная и дополненная реальность (далее соответственно — VR и AR) все шире используются для обучения безопасным методам работы и действиям в аварийных

ситуациях. Традиционные учения и инструктажи постепенно дополняются иммерсивными тренажерами, которые позволяют персоналу отрабатывать навыки в симулированной опасной среде. Исследования показывают, что применение VR/AR-технологий делает обучение технике безопасности более наглядным и эффективным, повышает уровень усвоения знаний и готовности к реальным ЧС. Например, с помощью VR можно смоделировать пожар в цехе и дать работникам потренироваться в тушении огня огнетушителем или эвакуации, не подвергая их реальной опасности. AR-технологии позволяют накладывать подсказки и инструкции на реальное окружение через специальные очки или планшеты: так, инженер, проходящий по объекту, может видеть указатели к ближайшим аварийным выходам или расположение скрытых пожарных гидрантов. В работе G. Lampropoulos et al. (2024 г.) проведен обзор применения AR/VR для промышленного обучения и сделан вывод, что иммерсивные технологии зарекомендовали себя как эффективный инструмент повышения компетенций в области охраны труда и снижения травматизма [5]. Уже сейчас многие международные корпорации (например, в строительстве и нефтехимии) внедряют VR-тренинги по реагированию на разливы, взрывы и другие ЧС. В России подобные решения также находят применение: созданы VR-тренажеры для подготовки сотрудников МЧС и промышленных аварийно-спасательных формирований, некоторые крупные компании (например, в горнодобывающем секторе) начинают оснащать учебные центры системами виртуальной реальности для отработки сценариев аварий.

Носимые устройства — еще одна современная технология, повышающая безопас-

ность работников при ЧС. К носимым устройствам относятся умные каски, браслеты, датчики, закрепленные на спецодежде, экзоскелеты и пр. Они позволяют в реальном времени отслеживать положение человека, его физиологические показатели (пульс, дыхание), воздействие на него вредных факторов (газовая среда, температура) и т. д. Системы мониторинга на основе носимых устройств уже сейчас внедряются на предприятиях в разных странах для контроля самочувствия работников и условий окружающей среды. К примеру, в США и Европе распространены носимые газоанализаторы для работников химических производств: при утечке токсичного газа прибор на теле работника подает сигнал тревоги и передает координаты пострадавшего в центр управления, что ускоряет спасательные операции. Другие примеры — «умные» каски с датчиком удара и положением (полезны при падении рабочего — сразу сигнализируют об инциденте), носимые трекеры усталости водителей погрузчиков (следят за состоянием и предупреждают о засыпании) и т. п. По итогам обзора (E. Svertoka et al., 2021 г.), носимые устройства можно классифицировать на несколько типов по функциям: мониторинг (сбор данных о состоянии работника и окружения), поддержка (например, экзоскелеты снижают нагрузку и предотвращают травмы), обучение (AR-очки для подсказок в процессе работы) и отслеживание местоположения [6]. Потенциал этих технологий для повышения безопасности огромен: они позволяют работодателю в режиме реального времени видеть ситуацию «на земле», мгновенно реагировать на отклонения (падение человека, превышение предельно допустимых концентраций газа и т. д.) и тем самым предотвращать тяжелые

последствия. В России направление, связанное с применением индустриальных носимых устройств, также развивается — особенно на предприятиях с высокими рисками (шахты, нефтегаз): там тестируются системы отслеживания местоположения шахтеров по bluetooth-маячкам, «умная» спецодежда с датчиками газа для работников нефтехимии и т. п. [6, 7]. Ожидается, что в ближайшие годы использование носимой электроники в охране труда станет повсеместной практикой.

Когда аварийная ситуация все же произошла, на первый план выходят технологии, повышающие эффективность аварийно-спасательных работ и снижающие риск для спасателей. Инновации здесь движутся в направлении роботизации и автоматизации реагирования. Уже созданы и применяются различные виды роботов, способных действовать в опасной зоне вместо человека: пожарные роботы для тушения пожаров в промышленном помещении, дистанционно управляемые гусеничные аппараты для разведки и ликвидации последствий аварий на химических объектах, роботизированные дроны для обследования труднодоступных или зараженных зон. Например, в ряде стран пожарные службы используют автономных наземных роботов, оснащенных тепловизорами и водяными пушками, которые могут заехать в горящий цех и подавлять пламя, не подвергая людей риску высоких температур. Также набирает популярность применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) при промышленно-техногенных ЧС — дроны позволяют быстро осуществить воздушную разведку аварийного объекта, обнаружить очаги пожара или утечки, оценить масштабы разрушений и найти пострадавших. Это значительно ускоряет принятие решений в первые минуты после аварии. Кроме

того, дроны могут доставлять медикаменты или противопожарные средства в зоны, куда сразу не могут добраться люди.

В Российской Федерации подобные технологии также внедряются: МЧС России на вооружении имеет несколько модификаций пожарных роботов (например, робототехнические комплексы для тушения пожаров «Уран-14»), а на стратегически важных предприятиях создаются ведомственные аварийно-спасательные команды, оснащенные дронами для мониторинга территории. Например, на некоторых газоперерабатывающих заводах введены автоматические системы пожаротушения, где при срабатывании датчиков пламени специальные самоходные установки начинают локализацию огня еще до прибытия пожарных расчетов.

Важно подчеркнуть, что эффективность инновационных решений во многом зависит от их интеграции в общую систему управления авариями и от умения персонала правильно ими пользоваться. Зарубежный опыт показывает, что технология сама по себе не гарантирует успеха — требуются продуманные регламенты и обучение. Например, при внедрении носимых датчиков нужно разработать четкий план действий при сигнале тревоги от них; при применении роботов — учесть тактику совместной работы робота и человека. Организационные инновации, такие как концепция «Оператор 4.0» — подготовленный высококвалифицированный оператор, работающий в тесном взаимодействии с умными машинами — также являются частью общего тренда «Безопасность 4.0». В «Оператор 4.0» человеческий фактор не устраняется, а усиливается за счет технологий: работник оснащен инструментами (AR, носимые устройства, ИИ-помощники), которые расширяют его возможности без-

опасно и эффективно действовать в любых ситуациях.

Таким образом, современные инновационные меры охватывают весь цикл управления ЧС: предупреждение (прогнозные аналитические системы), подготовку

(VR/AR-тренинги, обучение «Оператор 4.0»), мониторинг (сети IoT, носимые датчики) и непосредственное реагирование (роботы, автоматизированные системы). В таблице суммированы ключевые технологии и примеры их применения в последние годы.

Таблица
Основные инновационные меры противодействия ЧС на предприятиях (2020–2025 гг.)

Table

Main innovative emergency response measures at enterprises (2020–2025)

Направление инноваций Innovation area	Примеры технологий и решений Examples of technologies and solutions	Практическая реализация (Россия и мир) Practical implementation (Russia and worldwide)
Прогнозирование и профилактика Forecasting and prevention	Анализ больших данных датчиков; алгоритмы машинного обучения для предсказания отказов; ситуационные модели процессов (Digital Twin) Analysis of big sensor data; machine learning algorithms for failure prediction; situational process models (Digital Twin)	Система предупреждения аварий СПАС на химическом предприятии (Россия). Предиктивная аналитика на нефтегазовых платформах (мир) SPAS accident prevention system at a chemical plant (Russia). Predictive analytics on oil and gas platforms (world)
Непрерывный мониторинг (IoT) Continuous monitoring (IoT)	Сети датчиков и контроллеров, интегрированные в оборудование; автоматизированные системы раннего оповещения о ЧС Networks of sensors and controllers integrated into equipment; automated early warning systems for emergencies	Система дистанционного мониторинга параметров на АЭС (Россия). «Умные» датчики утечек и пожара на производствах (мир) Remote monitoring system at nuclear power plants (Russia). Smart leak and fire detectors at industries (world)
Поддержка решений операторов Operator decision support	Интеллектуальные СППР, рекомендуемые оптимальные действия при отклонениях; цифровые двойники для сценарного прогнозирования Intelligent decision support systems recommending optimal actions during deviations; digital twins for scenario forecasting	Decision Support System на основе нейросети для буровой (Россия). Цифровой двойник нефтеперерабатывающего завода (мир) Neural network-based Decision Support System for drilling (Russia). Digital twin of an oil refinery (world)
Обучение и подготовка (VR/AR) Training and preparation (VR/AR)	Виртуальные тренажеры аварийных ситуаций; системы дополненной реальности для обучения и инструктажей Virtual emergency simulators; augmented reality systems for training and instruction	VR-тренинг по эвакуации и пожаротушению на заводах (Россия и мир); AR-очки для обучения технике безопасности на стройплощадках (мир) VR training for evacuation and firefighting at factories (Russia and world); AR glasses for safety training at construction sites (world)
Носимые устройства (wearables) Wearable devices	Смарт-датчики в касках и спецодежде; трекеры локации и состояния работника; промышленные экзоскелеты Smart sensors in helmets and workwear; worker location and condition trackers; industrial exoskeletons	Система контроля газа и положения для шахтеров (Россия). Носимые датчики усталости и концентраций на фабриках (мир) Gas and positioning control system for miners (Russia). Wearable fatigue and pollutant exposure sensors at factories (world)

Окончание таблицы

Направление инноваций Innovation area	Примеры технологий и решений Examples of technologies and solutions	Практическая реализация (Россия и мир) Practical implementation (Russia and worldwide)
Робототехника и дроны Robotics and drones	Автономные пожарные роботы; беспилотные летательные аппараты наблюдения; дистанционно управляемые манипуляторы для аварийных работ Autonomous firefighting robots; unmanned aerial surveillance vehicles; remotely operated manipulators for emergency operations	Робототехнические комплексы МЧС для тушения пожаров (Россия). Роботы-разведчики и дроны на объектах химической промышленности (США, Япония) EMERCOM robotic firefighting complexes (Russia). Scout robots and drones at chemical industry sites (USA, Japan)

Заключение

Развитие технологий в период 2020–2025 гг. открывает новые возможности для противодействия чрезвычайным ситуациям на промышленных предприятиях.

Проведенный обзор показывает, что инновационные меры — от искусственного интеллекта и цифровых двойников до носимой электроники и робототехники — способны значительно повысить уровень промышленной безопасности. Зарубежный опыт (США, Европа, Азия) демонстрирует успешное снижение аварийности при внедрении систем концепции «Безопасность 4.0», сочетающих передовые технические решения и человеко-центричный подход к безопасности. Российские предприятия также активно перенимают эти практики: в исследованиях и пилотных проектах отечественных организаций реализованы системы прогнозирования аварий на основе ИИ [1, 4], цифровые модели технологических процессов для оценки рисков [4], тренажеры виртуальной реальности и другие новшества.

Важно подчеркнуть, что эффективная реализация инновационных мер требует комплексного подхода. Необходимо учитывать технические, организационные и человеческие аспекты: интеграция новых систем

должна сопровождаться обновлением нормативной базы, обучением персонала, развитием культуры безопасности на производстве. Как отмечают специалисты, вызовы «Безопасность 4.0» включают в себя вопросы кибербезопасности, стандартизации данных и преодоления сопротивления изменениям внутри организаций. Решение этих задач будет определять успех внедрения инноваций в долгосрочной перспективе.

Тем не менее тенденции последних лет однозначно указывают на то, что цифровые и инженерные инновации становятся неотъемлемой частью системы противодействия ЧС. Их применение позволяет переходить от реактивной стратегии — ликвидации последствий аварий — к проактивной стратегии упреждения аварийных ситуаций. Это ведет к сохранению жизней, снижению материального ущерба и повышению устойчивости критически важных объектов экономики. Можно ожидать, что в ближайшем будущем технологии прогнозирования, VR-обучения, роботизированного реагирования и другие обсужденные меры получат еще более широкое распространение. Их дальнейшее совершенствование — одна из ключевых задач науки о безопасности и инженерии катастроф на пути к нулевому травматизму и аварийности в промышленности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированная система предотвращения аварий при строительстве скважин / А. Н. Дмитриевский и др. // Нефтяное хозяйство. 2021. Т. 1167, № 1. С. 72–76. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-72-76
2. Park J., Kang D. Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 24. P. 11934. DOI: 10.3390/app142411934
3. Zio E., Miqueles L. Digital Twins in Safety Analysis, Risk Assessment and Emergency Management // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 246. P. 110040. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110040
4. Антонов О. В., Райкова Е. Ф., Муратов Р. Э. Система предотвращения аварийных ситуаций производственных технологических объектов на основе ситуационной математической модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 2. С. 22–32. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-2-22-32
5. Examining the Role of Augmented Reality and Virtual Reality in Safety Training / G. Lampropoulos et al. // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 19. P. 3952. DOI: 10.3390/electronics13193952
6. Wearables for Industrial Work Safety: A Survey / E. Svertoka et al. // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 3844. DOI: 10.3390/s21113844
7. Немчинов Д. В., Селиверстова А. Н., Антонов О. В. Поддержка принятия решений по управлению предаварийными ситуациями на примере установки каталитического риформинга // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 2. С. 19–25.

REFERENCES

1. Automated system for preventing accidents during well construction / A. N. Dmitrievsky et al. // Oil Industry. 2021. Vol. 1167, No. 1. Pp. 72–76. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-72-76
2. Park J., Kang D. Artificial Intelligence and Smart Technologies in Safety Management: A Comprehensive Analysis Across Multiple Industries // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 24. P. 11934. DOI: 10.3390/app142411934
3. Zio E., Miqueles L. Digital Twins in Safety Analysis, Risk Assessment and Emergency Management // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 246. P. 110040. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110040
4. Antonov O. V., Raykova E. F., Muratov R. E. System for preventing emergency situations at production technological facilities based on a situational mathematical model // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2022. No. 2. Pp. 22–32. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-2-22-32
5. Examining the Role of Augmented Reality and Virtual Reality in Safety Training / G. Lampropoulos et al. // Electronics. 2024. Vol. 13, No. 19. P. 3952. DOI: 10.3390/electronics13193952
6. Wearables for Industrial Work Safety: A Survey / E. Svertoka et al. // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 11. P. 3844. DOI: 10.3390/s21113844

7. Nemchinov D. V., Seliverstova A. N., Antonov O. V. Decision support in managing pre-emergency situations based on the example of a catalytic reforming unit // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2020. No. 2. Pp. 19–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пичугин Леонид Михайлович, аспирант факультета экономики Университета «СИНЕРГИЯ» (125080, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский пр., 80); e-mail: narukun20001@gmail.com

Лавров Валерий Юрьевич, e-mail: 26092001@mail.ru

Шабанова Светлана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Пищевая безопасность» Университета РОСБИОТЕХ (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11); e-mail: Shabanovasv@mgupp.ru

Абрамов Александр Дмитриевич, e-mail: jjabrabr@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonid M. Pichugin, graduate student, Synergy University, Faculty of Economics (80, Leningradsky Prospect, Moscow, 125080, Russian Federation); e-mail: narukun20001@gmail.com

Valery Yu. Lavrov, e-mail: 26092001@mail.ru

Svetlana V. Shabanova, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of Food Safety, ROSBIOTECH (11, Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russian Federation); e-mail: Shabanovasv@mgupp.ru

Alexander D. Abramov, e-mail: jjabrabr@mail.ru