

Научная статья

УДК 681.5; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-67-76

МЕТОДИКА РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОТБОРА СЕРИЙНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Гарелина Светлана Александровна.

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия.

Шарапов Сергей Владимирович.

Санкт-Петербургский пожарно-спасательный колледж, Санкт-Петербург, Россия

s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Эффективное предотвращение чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах невозможно без обоснованного выбора технических средств мониторинга и контроля производственного процесса, способного учитывать не только их соответствие нормативам, но и вклад в снижение риска. В работе разработана методика риск-ориентированного отбора серийных технических средств мониторинга и контроля производственного процесса, основанная на количественной зависимости потенциального ущерба от среднеквадратической погрешности измерений. Предложен алгоритм принятия решений, ориентированный на минимизацию ущерба от ошибок контроля в условиях ограниченного бюджета. Методика включает ранжирование контролируемых параметров по уровню риска, оценку снижения ущерба при модернизации технических средств мониторинга и контроля производственного процесса, а также выбор оптимальной комбинации замен с учетом затрат. Особенность подхода заключается в использовании метрологических характеристик как ключевого критерия эффективности. Для демонстрации работоспособности методики проведен расчет на примере металлургического предприятия. Методика может быть применена при проектировании, аудите и модернизации систем промышленного мониторинга.

Ключевые слова: техногенная безопасность, безопасность производственного процесса, мониторинг параметров производственного процесса, промышленный мониторинг, выбор средств для мониторинга, риск-ориентированный промышленный мониторинг

Для цитирования: Гарелина С.А., Шарапов С.В. Методика риск-ориентированного отбора серийных технических средств мониторинга и контроля на промышленных объектах // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 67–76. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-67-76.

Scientific article

METHODOLOGY FOR RISK-ORIENTED SELECTION OF SERIAL MONITORING AND CONTROL DEVICES AT INDUSTRIAL FACILITIES

Garelina Svetlana A.

Civil defence academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia.

Sharapov Sergey V.

Saint-Petersburg fire and rescue college, Saint-Petersburg, Russia

s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. Effective prevention of emergencies at industrial facilities is impossible without a well-founded selection of monitoring and control equipment for production processes, which should account not only for compliance with regulations but also for its contribution to risk reduction. This study presents a risk-oriented methodology for selecting off-the-shelf monitoring and control devices, based on a quantitative relationship between potential damage and the root mean square

error of measurements. A decision-making algorithm is proposed that aims to minimize damage resulting from control errors under budget constraints. The methodology includes ranking monitored parameters by risk level, assessing potential damage reduction through equipment modernization, and selecting the optimal combination of replacements considering associated costs. A key feature of the approach is the use of metrological characteristics as the main criterion for effectiveness. To demonstrate the applicability of the methodology, a case study is conducted for a metallurgical plant. The methodology can be applied during the design, audit, and modernization of industrial monitoring systems.

Keywords: technogenic safety, industrial process safety, industrial process parameter monitoring, industrial monitoring, selection of monitoring tools, risk-oriented industrial monitoring

For citation: Garelina S.A., Sharapov S.V. Methodology for risk-oriented selection of serial monitoring and control devices at industrial facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 67–76. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-67-76.

Введение

Предотвращение чрезвычайных ситуаций (ЧС) на промышленных объектах невозможно без точного и своевременного мониторинга и контроля параметров производственных процессов, что делает технические средства мониторинга и контроля (ТСМК) важным элементом системы обеспечения техногенной безопасности.

Хорошо известно, что высокая степень износа производственного оборудования остается одной из системных проблем промышленной инфраструктуры [1]. Согласно данным [1] изношенность оборудования на конец 2022 г. в автомобилестроении составила 63,6 %, в металлургии – 54,5 %, в химической промышленности – 48,7 %, что значительно превышает критический порог в 40 % для опасных производственных объектов [2] и свидетельствует о накоплении потенциальных рисков, связанных с надежностью и управляемостью технологических процессов. В этих условиях даже корректно поверенные системы мониторинга могут работать в нестабильных или изменившихся условиях эксплуатации, на которые они изначально не были рассчитаны. Это, в свою очередь, усиливает риски техногенных ЧС и требует пересмотра подходов к оснащению систем мониторинга с учетом актуального уровня риска и условий эксплуатации.

Дополнительную актуальность приобретает модернизация систем мониторинга и контроля, обусловленная ускоренным внедрением новых технологических решений. Эти процессы сопровождаются усложнением производственных операций, ростом числа критически важных параметров и сокращением времени, в течение которого возможно безопасное реагирование на аварийные отклонения, зачастую без должного сопровождения системами мониторинга и контроля [3, 4].

Параллельно усиливаются и внешние требования к надежности контроля. Многие промышленные объекты размещают вблизи жилых зон и в геоэкологически неблагоприятных регионах¹ [5], что повышает потенциальные последствия аварий и резко снижает допустимый уровень риска. В этих условиях принципиально возрастает значение частоты, регулярности и точности измерений, а также способности систем мониторинга обнаруживать отклонения на ранней стадии и обеспечивать достоверную сигнализацию. Между тем значительная часть существующих систем не была рассчитана на такие сценарии и нагрузки, что приводит к нарастанию как технологических, так и социальных рисков.

¹ Жильё возле промышленных объектов: что на самом деле опасно, а что – просто «страшилки»? URL: <https://bankstoday.net/last-articles/zhile-voze-promyshlennyh-obektov-cto-na-samom-dele-opasno-a-cto-prosto-strashilki> (дата обращения: 01.07.2025)

Материалы и методы исследования

Выбор ТСМК на промышленных объектах, как правило, осуществляют на основе ряда базовых принципов [6–12], среди которых:

- физическое соответствие измеряемому параметру, определяющее первичный отбор ТСМК по методу и диапазону измерений;
- метрологическая пригодность. Однако в массовой эксплуатации часто игнорируют деградацию характеристик во времени;
- достаточная точность – минимально необходимая для решения задач сигнализации и управления без избыточности;
- совокупная стоимость владения, включающая не только цену ТСМК, но и расходы на поверку, обслуживание, замену, совместимость и ресурс;
- возможность информационной интеграции;
- надежность и устойчивость к внешним воздействиям (важнее высокой точности при работе в тяжелых условиях);
- масштабируемость и низкая стоимость при массовом развертывании, особенно в распределенных системах.

Несмотря на эти принципы, на практике модернизация систем мониторинга сталкивается со следующими основными проблемами: отсутствие формализованных критериев выбора ТСМК по риск-ориентированным показателям; фрагментарность решений и низкий уровень системной интеграции; игнорирование ущерба от метрологических ошибок при обосновании инвестиций; инерционные закупочные процедуры и ограниченные бюджеты.

Существующие подходы модернизации, от классической замены и модульной реконструкции до сценарного анализа, иерархического выбора и цифровых двойников² [13–16], применяют точно. В целом выбор ТСМК в большинстве случаев остается компромиссным, основанным на сочетании нормативных требований, доступности, совместимости и эксплуатационных ограничений.

Таким образом, в условиях ограниченных ресурсов и повышенных требований к промышленной безопасности становится очевидной необходимость перехода от технически-ориентированного подхода к риск-ориентированной модели. В такой модели приоритет отдается выбору тех ТСМК, чьи метрологические характеристики в наибольшей степени влияют на риск возникновения и масштаб возможной ЧС.

Существенным теоретическим основанием предлагаемой методики является установленная в работе [17] зависимость потенциального ущерба от среднеквадратической погрешности (СКП) измерений. Показано, что увеличение неопределенности при измерении параметров производственного процесса, в частности, рост СКП σ , ведет к повышению вероятности как ложных срабатываний (ошибки первого рода), так и пропущенных аварийных состояний (ошибки второго рода). Соответствующие ущербы выражаются следующим образом: ущерб первого рода $U_I \propto \sigma$, второго рода для двумерного $U_{II} \propto \sigma^2$ и объемного $U'_{II} \propto \sigma^3$ распространения ЧС.

Таким образом, снижение СКП в результате модернизации ТСМК прямо способствует снижению потенциального ущерба и повышению достоверности прогнозирования. Это позволяет формализовать выбор технических решений на основе их вклада в минимизацию риска ЧС и использовать метрологические параметры как количественные критерии эффективности системы мониторинга.

² СТО 18000.1-002–2020. Идентификация опасностей и управление рисками в области промышленной безопасности: метод сценарного анализа: «Что будет, если...». URL: <https://noyabrsk-dobycha.gazprom.ru/d/textpage/12/18/sto-18000.1-002-2020-identifikatsiya-opasnostej-i-upravlenie-riskami.pdf> (дата обращения: 01.07.2025).

При модернизации систем мониторинга снижение СКП позволяет выразить ожидаемое уменьшение ущерба в следующем виде

$$Y_{\text{Им}} = (\sigma_{\text{м}}/\sigma)Y_{\text{И}}, \quad Y_{\text{Им}} = (\sigma_{\text{м}}/\sigma)^2 Y_{\text{И}}, \quad (1)$$

где σ , $\sigma_{\text{м}}$ – СКП установленного и модернизированного ТСМК; $Y_{\text{И}}$, $Y_{\text{Им}}$, $Y_{\text{Им}}$ – исходные значения ущерба и соответствующие значения ущерба после модернизации системы мониторинга и контроля.

Эта зависимость закладывает основу для обоснованного выбора между серийными ТСМК с разными метрологическими характеристиками. Она позволяет количественно сравнивать потенциальный эффект от снижения СКП и учитывать его при принятии решений в условиях ограниченного бюджета и ресурсных ограничений.

Применение зависимости (1) в рамках методики обеспечивает формализацию критерия выбора ТСМК, ориентированного не на номинальную точность, а на минимизацию ожидаемого ущерба от ЧС.

Алгоритм методики

Пусть на модернизацию комплекта ТСМК выделена сумма C_{Σ} рублей. При этом предполагается, что эта сумма существенно превышает стоимость любого отдельного ТСМК, подлежащего модернизации. Комплект ТСМК обеспечивает измерение p физических параметров процесса, из которых планируется заменить d наиболее критичных с точки зрения риска.

В качестве критерия оптимальности модернизационных решений принимается минимизация ожидаемого ущерба от аварийных событий и ЧС: $Y \rightarrow \min$.

Этап 1. Ранжирование параметров. Вначале проводят ранжирование физических параметров процесса по величине потенциального ущерба при выходе за допустимые пределы измеряемого параметра X . Обозначим такие параметры и соответствующий ущерб как: $X_1 \rightarrow Y_1$, $X_2 \rightarrow Y_2$, ..., $X_d \rightarrow Y_d$.

Этап 2. Выбор вариантов замены. Допустим, для измерения физического параметра X_1 доступны два альтернативных ТСМК: ТСМК₁₋₁ с погрешностью $\sigma_{1-1} < \sigma_1$ и стоимостью C_{1-1} ; ТСМК₁₋₂ с погрешностью $\sigma_{1-2} < \sigma_1$ и стоимостью C_{1-2} .

Каждая альтернатива приводит к снижению ущерба.

При установке ТСМК₁₋₁: $Y_{1-1} = Y_1(\sigma_{1-1}/\sigma_1)^2$, $\Delta Y_{1-1} = Y_1 - Y_{1-1} = Y_1(1 - (\sigma_{1-1}/\sigma_1)^2)$. Оставшиеся средства равны: $C_{\Sigma} - C_{1-1}$.

При установке ТСМК₁₋₂: $\Delta Y_{1-2} = Y_1(1 - (\sigma_{1-2}/\sigma_1)^2)$. Оставшиеся средства: $C_{\Sigma} - C_{1-2}$.

Этап 3. Последующие замены. Аналогично анализируют варианты замены ТСМК для второго по ущербу параметра X_2 , с выбором между ТСМК₂₋₁ ($\sigma_{2-1} < \sigma_2$, стоимость C_{2-1}), ТСМК₂₋₂ ($\sigma_{2-2} < \sigma_2$, стоимость C_{2-2}).

Комбинации возможных замен накапливаются: $C_{\Sigma} - C_{1-1} - C_{2-1}$, $C_{\Sigma} - C_{1-1} - C_{2-2}$, $C_{\Sigma} - C_{1-2} - C_{2-1}$, $C_{\Sigma} - C_{1-2} - C_{2-2}$ и т.д.

Этап 4. Формирование дерева решений. Пошаговая реализация алгоритма приводит к формированию дерева событий, каждая ветвь которого представляет собой уникальную комбинацию замен ТСМК, соответствующую определенному уровню затрат и достижимого снижения ущерба.

Этап 5. Выбор оптимальной стратегии. После построения дерева решений проводят анализ всех возможных сценариев. Для каждой ветви рассчитывают итоговое снижение ущерба ΔY . В качестве оптимального решения выбирают тот набор модернизируемых ТСМК, который обеспечивает максимальное снижение совокупного ущерба при заданном бюджете: $\Delta Y \rightarrow \max$ при $\sum C_{i-j} \leq C_{\Sigma}$.

Ограничения методики:

- невозможность учета деградации ТСМК во времени. Методика не включает динамическое изменение СКП из-за старения или внешних факторов;
- отсутствие учета стоимости жизненного цикла. Сравнение ТСМК проводят по стоимости закупки и ущербу от неопределенности измерений без учета полной стоимости владения;
- линейный подход к установлению приоритетов замены. Методика предполагает последовательность решений на основе убывания ущерба, что ограничивает возможность учета межпараметрических зависимостей и комплексного эффекта в сложных производственных системах.

Полноценная реализация риск-ориентированной отбора серийных ТСМК требует наличия широкого массива исходных данных, включая значения потенциального ущерба от сбоев и аварий на конкретном промышленном объекте, статистику ложных и пропущенных срабатываний, характеристики технологических процессов и режимов работы оборудования, фактические значения СКП эксплуатируемых ТСМК и динамику их изменения во времени, экономические ограничения и параметры жизненного цикла оборудования. Однако такие данные далеко не всегда доступны в практической деятельности. Поэтому в рамках данной работы верификация методики проводится на частном примере.

Показано, как выбор конкретного варианта ТСМК влияет на снижение сопутствующего потенциального ущерба второго рода. Это позволяет продемонстрировать работоспособность модели на локальном уровне, уточнить роль СКП в системе управления рисками, сформировать обоснованные рекомендации по выбору ТСМК при ограниченном бюджете. Таким образом, даже частная апробация позволит подтвердить фундаментальную применимость методики и обосновать ее внедрение в системы проектирования, аудита и модернизации промышленных объектов.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве частного примера апробации методики рассмотрен металлургический комбинат, на котором эксплуатируют три типа ТСМК: пирометры, газоанализаторы и системы радиационного контроля движущегося транспорта. Сравнивались два варианта оснащения:

- применение стандартных серийных ТСМК, соответствующих действующим нормативным требованиям;
- замена этих ТСМК на ТСМК с улучшенными метрологическими характеристиками.

Для оценки изменения ущерба в результате модернизации использовались значения абсолютной и/или относительной основной погрешности. Поскольку во многих практических случаях СКП пропорциональна абсолютной погрешности (при сохранении диапазона измерений и стабильности условий эксплуатации), их отношение может служить приближенной оценкой отношения СКП. Это допустимо при сравнении ТСМК одного назначения, работающих в сопоставимых условиях. В соответствии с этим допущением, для расчета ожидаемого снижения ущерба использовались отношения абсолютных и/или относительных погрешностей, как приближенный аналог отношения СКП.

Метрологические характеристики различных типов ТСМК, используемых на промышленном объекте, существенно различаются не только по значениям погрешностей, но и по диапазонам измерений, в пределах которых эти характеристики заданы. Для приближенной оценки эффективности модернизации и сопоставления вариантов оснащения была принята усредненная величина погрешности, соответствующая типичным условиям эксплуатации каждого типа ТСМК. Такой подход оправдан на этапе предварительного риск-анализа, когда необходимо получить ориентировочные оценки влияния замены ТСМК на снижение ущерба. Вместе с тем при переходе к более точному анализу рисков требуется учитывать конкретные рабочие интервалы измерений, анализировать распределение

погрешности по диапазону и условиям измерений, использовать вероятностные характеристики точности, чувствительности и стабильности показаний ТСМК, моделировать влияние метрологических погрешностей на динамику прогнозируемых сценариев ЧС.

В таблице приведены исходные данные и результаты расчета снижения ущерба при замене исходных ТСМК на ТСМК с улучшенными характеристиками.

Таблица

Результаты расчета снижения ущерба от ошибок второго рода при замене исходных ТСМК на ТСМК с улучшенными метрологическими характеристиками

Параметр контроля	Стандартный ТСМК	Погрешность	Разработанный ТСМК	Погрешность	Снижение ущерба $U_{II}/U_{IIм}$
Температура (пирометрия)	Проминь-М2	$\pm 35^\circ\text{C}$ (при $2\,000^\circ\text{C}$) $\approx 1,75\%$	Термоконт [18]	$\pm 1\%$	$(1,75/1)^2 = 3$
Концентрация газов	ДАХ-М	$\pm 25\%$	Мегакон 10К [19]	$\pm 15\%$	$(25/15)^2 = 2,8$
Радиационный контроль	ДКС-96	$\pm 40\%$	СИММЕТ [20]	$\pm 20\%$	$(40/20)^2 = 4$

При полной замене комплекта ТСМК на рассматриваемом промышленном объекте, согласно проведенной оценке, достигается в среднем 3,5-кратное снижение риска, связанного с ущербом от ошибок второго рода.

Даже при относительно небольших различиях в погрешностях замена исходных ТСМК на более точные приводит к существенному снижению потенциального ущерба, поскольку последний пропорционален квадрату (а для объемных сценариев – кубу) СКП. Это означает, что даже умеренное улучшение метрологических характеристик ТСМК способно многократно снизить техногенный риск. Таким образом, роль СКП как количественного критерия при выборе ТСМК резко возрастает и должна учитываться в первую очередь при проектировании и модернизации систем промышленного мониторинга.

Дополнительно, в соответствии с предложенной методикой риск-ориентированного отбора, может быть проведена оценка рентабельности замены каждого конкретного ТСМК, исходя из соотношения между затратами и ожидаемым снижением ущерба. Такой анализ необходим при ограниченном бюджете или необходимости обосновать экономическую целесообразность замены конкретных ТСМК.

Для каждого варианта замены можно ввести показатель эффективности

$$\text{Эффективность замены} = \Delta U / C_{\text{замены}}, \quad (2)$$

где ΔU – снижение потенциального ущерба за счет замены ТСМК; $C_{\text{замены}}$ – стоимость замены данного ТСМК на более точный аналог.

Если эффективность значительно превышает единицу (то есть ущерб снижается на сумму, существенно превышающую стоимость замены), такая замена может считаться рентабельной. В противном случае приоритет может быть отдан другим ТСМК или сценариям.

Научная новизна методики заключается в разработке нового подхода к обоснованному выбору серийных ТСМК, основанному на интеграции метрологических характеристик и оценки риска ущерба от неопределенности измерений. Впервые в качестве критерия выбора серийных ТСМК предложено использовать связь между СКП и потенциальным ущербом, позволяющую формализовать вклад каждого ТСМК в общую систему управления рисками. Методика учитывает степень влияния измеряемого параметра на производственную безопасность, чувствительность ущерба к точности измерений, ресурсные ограничения (бюджет, доступность оборудования), условия эксплуатации и возможности адаптации серийных ТСМК. Таким

образом, обеспечивается обоснованный отбор серийных ТСМК на основе баланса между метрологической пригодностью и экономической эффективностью, что ранее не было реализовано в существующих подходах.

Ограничения методики:

- невозможность учета деградации ТСМК во времени. Методика не включает динамическое изменение СКП из-за старения или внешних факторов;

- отсутствие учета стоимости жизненного цикла. Сравнение ТСМК проводят по стоимости закупки и ущербу от неопределенности измерений, без учета полной стоимости владения (обслуживание, проверка, замена и пр.);

- линейный подход к установлению приоритетов замены. Методика предполагает последовательность решений на основе убывания ущерба, что ограничивает возможность учета межпараметрических зависимостей и комплексного эффекта в сложных производственных системах.

Заключение

Предложена и обоснована методика риск-ориентированного отбора серийных ТСМК, основанная на количественной зависимости между СКП и потенциальным ущербом от ошибок второго рода. Это позволяет формализовать выбор оборудования не только по метрологическим, но и по экономико-рисковым критериям.

Введен аналитический показатель рентабельности замены (отношение снижения ущерба к стоимости модернизации), позволяющий оптимизировать бюджет в условиях ограниченных ресурсов.

Продемонстрирована работоспособность методики на частном примере металлургического предприятия. Показано, что полная замена трех типов ТСМК (пирометр, газоанализатор, радиационный модуль) на средства с улучшенными метрологическими характеристиками снижает риск ЧС, связанный с ошибками второго рода, в среднем в 3,5 раза.

Методика позволяет учитывать вклад каждого измеряемого параметра в совокупный риск, а также ранжировать приоритеты модернизации оборудования в зависимости от степени влияния на безопасность производственного процесса.

Предложенный подход восполняет существующие пробелы в практике выбора ТСМК, включая отсутствие связи между метрологическими характеристиками и риском, игнорирование ущерба от ошибок измерений.

Несмотря на упрощения, методика доказала прикладную применимость, может быть встроена в процедуры модернизации, аудита и проектирования систем мониторинга, а также использоваться при закупках серийных ТСМК в целях повышения промышленной безопасности.

Список литературы

1. Фурсова Т.В., Фатеев К.В. Износ основных фондов на предприятиях России как проблема реализации программы импортозамещения // Вестник МФЮА. 2024. № 1. С. 209–216.
2. Кудреватых Н.В. Экономическая безопасность региона: учеб. пособие для студентов. СПб.: ИЦ Интермедия, 2016. 168 с.
3. Гуменюк В.И., Ломасов В.Н. Радиационная, химическая и биологическая безопасность. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет, 2016. 347 с.
4. Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. М.: Деловой экспресс, 2004. 352 с.
5. Наимов Х.Ф., Кулматова Л.С. История и развитие Рогунской ГЭС // Проблемы науки. 2019. № 4 (40). С. 65–69.

6. Никулина Д.П. Совершенствование системы комплексного мониторинга технического состояния площадных объектов магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2021. 150 с.
7. Яковлев Д.Ю., Чурсин С.Е. Методика выбора средств измерений в условиях многопараметрического мониторинга // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Энергетика. 2020. № 2. С. 45–51.
8. Дунаев А.И., Карякин С.В. Интеграция датчиков в SCADA: выбор и критерии // Вестник МЭИ. 2021. № 4. С. 62–68.
9. A Cost-Effective Approach for Sensor Selection in Large-Scale Monitoring Systems / N. Saha [et al.] // *Soft Computing*. 2019. Vol. 24. P. 13567–13578.
10. Солдатов С. Интеграция SCADA-систем и систем управления предприятием // В Записную книжку инженера. 2015. С. 90–94. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/124560/> (дата обращения: 01.07.2025).
11. Мёрфи К. Выбор подходящего датчика для предиктивного технического обслуживания // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2020. № 9. С. 96–102.
12. Егоров А. А. Систематика, принципы работы и области применения датчиков // *Журнал радиоэлектроники*. 2009. № 3. С. 1–22.
13. Integration of Legacy Industrial Equipment in a Building Management System Industry 5.0 Scenario / A. Korodi [et al.] // *Electronics*. 2024. Vol. 13. № 16. Article 3229. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/16/3229> (дата обращения: 01.07.2025).
14. Modular Sensor Platform for Service Oriented Cyber Physical Systems in the European Tool Making Industry / G. Schuh [et al.] // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 17. P. 374–379.
15. Al B'ool Sh. M. Selection of Temperature Measuring Sensors Using the Analytic Hierarchy Process // *Systems Science and Industrial Engineering Faculty Scholarship (Binghamton Univ.)*. 2011. Article 9. URL: https://orb.binghamton.edu/systems_fac/9 (дата обращения: 01.07.2025).
16. A Comprehensive Review of Digital Twin – Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies / A. Thelen [et al.] // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65. № 12. Article 354.
17. Гарелина С.А. Снижение риска чрезвычайных ситуаций на производственных объектах // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты образования*. 2023. № 4 (59). С. 30–42.
18. Гарелина С.А., Латышенко К.П., Фрунзе А.В. Методы и средства измерений температуры. Пирометры. Исследование и разработка. Химки: АГЗ МЧС России, 2022. 156 с.
19. Оценка перспективности применения нового газоанализатора «Мегакон-10К» в МЧС России / С.А. Гарелина [и др.] // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 22 (162). С. 24–29.
20. Математическое моделирование дозиметрических систем контроля / И.Ю. Сергеев [и др.] // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2020. № 1. С. 60–64.

References

1. Fursova T.V., Fateev K.V. Iznos osnovnyh fondov na predpriyatiyah Rossii kak problema realizacii programmy importozameshcheniya // *Vestnik MFYUA*. 2024. № 1. S. 209–216.
2. Kudrevatyh N.V. *Ekonomicheskaya bezopasnost' regiona: ucheb. posobie dlya studentov*. SPb.: IC Intermediya, 2016. 168 s.
3. Gumenyuk V.I., Lomasov V.N. *Radiacionnaya, himicheskaya i biologicheskaya bezopasnost'*. SPb.: Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet, 2016. 347 s.
4. Akimov V.A., Lesnyh V.V., Radaev N.N. *Osnovy analiza i upravleniya riskom v prirodnoj i tekhnogennoj sferah*. M.: Delovoj ekspress, 2004. 352 s.
5. Naimov H.F., Kulmatova L.S. Istoriya i razvitie Rogunskoj GES // *Problemy nauki*. 2019. № 4 (40). S. 65–69.

6. Nikulina D.P. Sovershenstvovanie sistemy kompleksnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya ploshchadnykh ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov: dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: RGU nefti i gaza im. I. M. Gubkina, 2021. 150 s.
7. Yakovlev D.Yu., Chursin S.E. Metodika vybora sredstv izmerenij v usloviyakh mnogoparametricheskogo monitoringa // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Energetika. 2020. № 2. S. 45–51.
8. Dunaev A.I., Karyakin S.V. Integraciya datchikov v SCADA: vybor i kriterii // Vestnik MEI. 2021. № 4. S. 62–68.
9. A Cost-Effective Approach for Sensor Selection in Large-Scale Monitoring Systems / H. Saha [et al.] // Soft Computing. 2019. Vol. 24. P. 13567–13578.
10. Soldatov S. Integraciya SCADA-sistem i sistem upravleniya predpriyatiem // V Zapisnuyu knizhku inzhenera. 2015. S. 90–94. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/spravochnik/v-zapisnuyu-knizhku-inzhenera/124560/> (data obrashcheniya: 01.07.2025).
11. Myorfi K. Vybora podhodyashchego datchika dlya prediktivnogo tekhnicheskogo obsluzhivaniya // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. 2020. № 9. S. 96–102.
12. Egorov A. A. Sistematika, principy raboty i oblasti primeneniya datchikov // Zhurnal radioelektroniki. 2009. № 3. S. 1–22.
13. Integration of Legacy Industrial Equipment in a Building Management System Industry 5.0 Scenario / A. Korodi [et al.] // Electronics. 2024. Vol. 13. № 16. Article 3229. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/16/3229> (data obrashcheniya: 01.07.2025).
14. Modular Sensor Platform for Service Oriented Cyber Physical Systems in the European Tool Making Industry / G. Schuh [et al.] // Procedia CIRP. 2014. Vol. 17. P. 374–379.
15. Al B'ool Sh. M. Selection of Temperature Measuring Sensors Using the Analytic Hierarchy Process // Systems Science and Industrial Engineering Faculty Scholarship (Binghamton Univ.). 2011. Article 9. URL: https://orb.binghamton.edu/systems_fac/9 (data obrashcheniya: 01.07.2025).
16. A Comprehensive Review of Digital Twin – Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies / A. Thelen [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2022. Vol. 65. № 12. Article 354.
17. Garelina S.A. Snizhenie riska chrezvychajnykh situacij na proizvodstvennykh ob"ektakh // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity obrazovaniya. 2023. № 4 (59). S. 30–42.
18. Garelina S.A., Latyshenko K.P., Frunze A.V. Metody i sredstva izmerenij temperatury. Pirometry. Issledovanie i razrabotka. Himki: AGZ MCHS Rossii, 2022. 156 s.
19. Ocenka perspektivnosti primeneniya novogo gazoanalizatora «Megakon-10K» v MCHS Rossii / S.A. Garelina [i dr.] // Alternativnaya energetika i ekologiya. 2014. № 22 (162). S. 24–29.
20. Matematicheskoe modelirovanie dozimetricheskikh sistem kontrolya / I.Yu. Sergeev [i dr.] // Sibirskij pozharo-spatatel'nyj vestnik. 2020. № 1. C. 60–64.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.04.2025; одобрена после рецензирования: 12.05.2025;
принята к публикации: 03.06.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 10.04.2025; approved after review: 12.05.2025;
accepted for publication: 03.06.2025

Информация об авторах:

Гарелина Светлана Александровна, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1 А), кандидат технических наук, доцент, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0784-3003>, SPIN-код: 8591-0495

Шарапов Сергей Владимирович, директор Санкт-Петербургского пожарно-спасательного колледжа (193315, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 52, к. 1, лит. К), доктор технических наук, профессор, e-mail: shcsv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9053-0085>, SPIN-код: 7386-9524

Information about the authors:

Garelina Svetlana A., professor of the department of mechanics and engineering graphics of Civil defence academy of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., bldg. 1 A), candidate of technical sciences, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 8591-0495

Sharapov Sergey V., director of Saint-Petersburg fire and rescue college (193315, Saint-Petersburg, Bolshhevikov pr. 52, block 1, unit K), doctor of technical sciences, professor, e-mail: shcsv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9053-0085>, SPIN: 7386-9524