IMPROVING THE EFFICIENCY OF VENTILATION AND DUST SUPPRESSION SYSTEMS TO ENSURE INDUSTRIAL SAFETY IN UNDERGROUND MINING WORKINGS

A.N. Tokareva, M.S. Demchenko, V.A. Gladkikh, E.M. Dorofeev

The paper considers the problem of improving the efficiency of ventilation and local dust suppression systems in underground mine workings as an important factor in ensuring industrial safety at mining enterprises. The aerological conditions of a mine working were analyzed and experimental studies were carried out to assess the influence of airflow parameters and water spraying on dust aerosol concentration in the working area. Measurements were performed under different ventilation regimes and water pressure levels in the spraying system. The results show that the use of ventilation or dust suppression alone provides only a limited reduction in dust concentration. The highest efficiency is achieved when these methods are applied simultaneously. Experimental results demonstrate that increasing the airflow velocity to about 1 m/s combined with water spraying at a pressure of 0.6 MPa reduces dust concentration by 68–71% compared with the initial conditions and significantly shortens the air purification time in the working area.

Key words: underground mine workings, industrial safety, mine ventilation, dust aerosols, dust suppression, aerological conditions.

Tokareva Anna Nikolaevna, candidate of technical sciences, associate professor, tanna_ing@mail.ru, Russia, Zernograd, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Don State Agrarian University in Zernograd,

Demchenko Maria Stanislavovna, candidate of technical sciences, associate professor, 24marija04@mail.ru, Russia, Zernograd, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Don State Agrarian University in Zernograd,

Gladkikh Vitaly Aleksandrovich, candidate of technical sciences, associate professor, Director of the Research and Information Center "MGSU STROY-TEST", gladkich_87@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State University of Civil Engineering,

Dorofeev Evgeniy Mikhailovich, candidate of pedagogical sciences, 79180401222@yandex.ru, Russia, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University

Received: 14.11.2025. Revised: 18.01.2026. Accepted: 31.03.2026

УДК 004.9:658.5

ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

И.В. Юдаев, В.В. Гамага, В.В. Серёгина, Н.М. Удинцова

Рассматриваются современные подходы к обеспечению промышленной и экологической безопасности производственных систем в условиях цифровой трансформации промышленности. Проведен анализ возможностей применения цифровых технологий мониторинга, автоматизированных систем контроля и интеллектуальных методов обработки данных для повышения эффективности управления производственными процессами. Особое внимание уделено использованию технологий промышленного интернета вещей и аналитических платформ, обеспечивающих сбор и обработку больших массивов технологической информации. Показано, что интеграция цифровых инструментов в систему производственного контроля позволяет своевременно выявлять отклонения в работе оборудования, снижать уровень производственных рисков и минимизировать негативное воздействие промышленной деятельности на окружающую среду. Сделан вывод о необходимости формирования комплексных подходов, объединяющих технологические, организационные и информационные решения для повышения устойчивости и безопасности функционирования промышленных предприятий.

Ключевые слова: цифровизация промышленности, промышленная безопасность, экологическая безопасность, промышленный интернет вещей, анализ данных, управление производственными рисками.

Введение. Современное развитие промышленности сопровождается интенсивным внедрением цифровых технологий, автоматизированных систем управления и интеллектуальных методов обработки данных. Процессы цифровизации охватывают практически все отрасли промышленного производства, включая предприятия минерально-сырьевого комплекса, энергетики, металлургии и машиностроения. В условиях глобального перехода к цифровой экономике существенно меняются подходы к организации производственных процессов, управлению технологическими системами и обеспечению промышленной и экологической безопасности [1–3]. При этом рост сложности технологических систем, увеличение объемов обрабатываемых данных и интеграция различных цифровых платформ создают новые вызовы, связанные с обеспечением безопасных условий труда и минимизацией негативного воздействия производства на окружающую среду [4–5].

Одним из основных направлений решения данной проблемы является совершенствование систем промышленной безопасности на основе применения цифровых технологий мониторинга и анализа производ-

ственных процессов. Использование датчиков, автоматизированных систем контроля, технологий промышленного интернета вещей и интеллектуальных алгоритмов анализа данных позволяет оперативно выявлять отклонения в работе оборудования и предотвращать возникновение аварийных ситуаций. Преимуществом такого подхода является повышение оперативности управления безопасностью и возможность комплексного анализа большого объема информации о состоянии технологических систем. Однако внедрение цифровых решений требует значительных организационных и технических ресурсов, а также сопряжено с необходимостью интеграции новых технологий в существующую производственную инфраструктуру [6, 7].

Другим направлением является разработка организационно-технических мер, направленных на повышение уровня экологической безопасности и снижение профессиональных рисков для персонала. Такие меры включают совершенствование процедур производственного контроля, внедрение систем оценки рисков, а также использование цифровых платформ для поддержки принятия управленческих решений. Достоинством данного подхода является возможность комплексного учета различных факторов, влияющих на безопасность производства, однако его эффективность во многом зависит от качества исходных данных и уровня подготовки персонала [8–10].

В условиях активной цифровой трансформации промышленности особую актуальность приобретает разработка комплексных подходов, позволяющих объединить технологические, организационные и информационные меры обеспечения промышленной и экологической безопасности. Формирование таких подходов способствует повышению эффективности управления производственными процессами, снижению вероятности аварийных ситуаций и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим обоснование комплексных мер по обеспечению безопасности персонала в условиях цифровизации производственных процессов является важной научной и практической задачей.

Целью настоящей работы является обоснование комплекса организационно-технических мер, направленных на повышение уровня промышленной и экологической безопасности персонала в условиях цифровизации производственных процессов.

Методология исследования. Для достижения поставленной цели авторами была проведена серия исследовательских и расчетно-аналитических работ, направленных на обоснование комплекса мер по повышению уровня промышленной и экологической безопасности персонала в условиях цифровизации производственных процессов. Общий план исследования включал анализ существующих производственных рисков на одном из типовых участков промышленного предприятия, оценку возможностей применения цифровых средств мониторинга параметров производственной среды, а также разработку и апробацию набора организационно-технических мероприятий, позволяющих повысить уровень контроля за потенциально опасными факторами.

На первом этапе была проведена оценка факторов промышленной и экологической опасности, характерных для рассматриваемого производственного участка. В качестве исходных данных использовались результаты инструментального контроля параметров производственной среды, включая концентрации аэрозольных частиц, уровень шума и микроклиматические показатели. Измерения проводились с использованием газоанализатора модели МГЛ-19, портативного пылемера АТМ-101 и шумомера Testo 816-1. Регистрация параметров осуществлялась в течение рабочей смены с интервалом 10 минут, что позволило сформировать массив экспериментальных данных о динамике изменения показателей производственной среды.

На втором этапе выполнялась цифровая обработка полученной информации и оценка рисков воздействия неблагоприятных факторов на персонал. Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программной среды MATLAB R2022a и табличного процессора Microsoft Excel. Для анализа использовались методы статистической обработки данных, включая расчет средних значений, дисперсий и коэффициентов вариации, а также построение зависимостей изменения параметров производственной среды во времени.

Заключительный этап работы был направлен на разработку и обоснование комплекса организационно-технических мер, основанных на использовании цифровых средств мониторинга и оперативного контроля параметров производственной среды. В рамках данного этапа была предложена схема интеграции датчиков контроля опасных факторов в существующую информационную систему производственного контроля, а также проведена оценка эффективности предложенных решений на основе сравнительного анализа полученных экспериментальных данных.

Экспериментальная часть. В ходе проведенных исследований была выполнена оценка параметров производственной среды на рассматриваемом участке промышленного предприятия, а также проанализирована динамика изменения факторов, потенциально влияющих на промышленную и экологическую безопасность персонала. Полученные экспериментальные данные позволили определить характер распределения контролируемых параметров в течение рабочей смены и выявить периоды наибольшей интенсивности воздействия неблагоприятных факторов.

Результаты измерений концентрации аэрозольных частиц в рабочей зоне показали, что среднее значение данного показателя в течение смены составляло 3,4 мг/м³ при минимальном зарегистрированном значении 1,9 мг/м³ и максимальном значении 5,6 мг/м³. При этом наибольшие значения концентрации пыли наблюдались в периоды выполнения операций, связанных с перемещением и обработкой сыпучих материалов. Анализ временной динамики показал, что в течение первых двух часов рабочей смены средняя концентрация аэрозольных частиц находилась на уровне 2,7 мг/м³, однако к середине смены данный показатель увеличивался до 3,8–4,2 мг/м³.

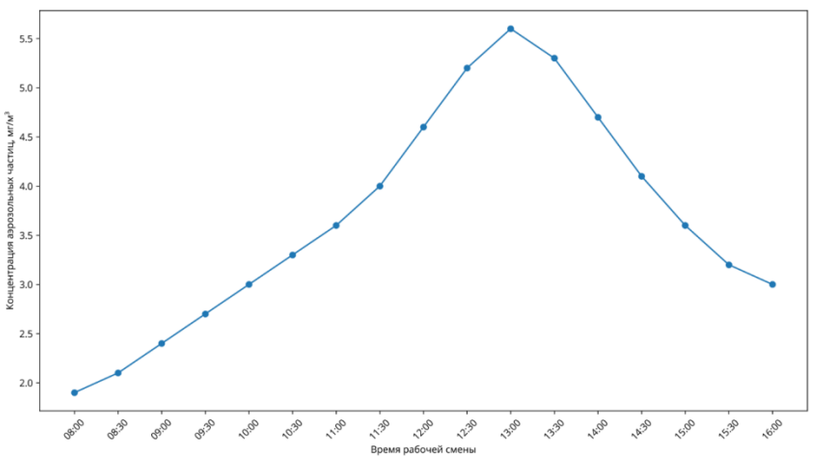
Максимальные значения фиксировались в интервале времени с 12:00 до 13:30, когда концентрация пыли достигала 5,2–5,6 мг/м³. После завершения наиболее интенсивных технологических операций наблюдалось постепенное снижение показателя до уровня 3,0–3,2 мг/м³. Обобщенные результаты инструментальных измерений параметров производственной среды в течение рабочей смены представлены в таблице.

Дополнительный анализ показал, что коэффициент вариации концентрации аэрозольных частиц составлял 21,4 %, что свидетельствует о достаточно высокой неравномерности распределения данного параметра во времени. При этом в ряде временных интервалов наблюдалось превышение условно допустимого уровня концентрации пыли, что указывает на необходимость совершенствования систем контроля и оперативного реагирования на изменение параметров производственной среды.

Результаты инструментального мониторинга параметров производственной среды на исследуемом производственном участке в течение рабочей смены

Время измерения	Концентрация аэрозольных частиц, мг/м³	Уровень шума, дБА	Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Производственная нагрузка оборудования, %
08:00	1,9	74,2	19,2	52	0,12	35
08:30	2,1	75,0	19,8	51	0,14	38
09:00	2,4	76,3	20,3	49	0,15	42
09:30	2,7	78,1	20,8	48	0,17	48
10:00	3,0	80,4	21,2	47	0,18	55
10:30	3,3	82,2	21,6	46	0,19	63
11:00	3,6	84,1	22,0	45	0,20	70
11:30	4,0	85,6	22,4	44	0,21	78
12:00	4,6	87,3	22,9	43	0,23	85
12:30	5,2	88,1	23,2	42	0,25	91
13:00	5,6	90,2	23,6	41	0,27	95
13:30	5,3	88,7	24,1	40	0,28	92
14:00	4,7	87,1	23,7	41	0,26	86
14:30	4,1	85,4	23,2	42	0,24	79
15:00	3,6	84,0	22,7	44	0,22	70
15:30	3,2	83,1	22,2	45	0,20	62
16:00	3,0	82,0	21,9	46	0,19	55

Исследование уровней шума показало, что среднее значение эквивалентного уровня звукового давления в рабочей зоне составляло 82,6 дБА. Минимальные значения фиксировались в начале рабочей смены и находились на уровне 74–76 дБА, тогда как в периоды активной работы оборудования уровень шума возрастал до 86–88 дБА. В отдельных случаях при одновременной работе нескольких единиц технологического оборудования регистрировались кратковременные пики до 90,2 дБА. Расчет коэффициента вариации данного показателя показал значение 9,8 %, что указывает на от-



Динамика изменения концентрации аэрозольных частиц в рабочей зоне в течение производственной смены

носительно стабильный характер шумового воздействия по сравнению с аэрозольным фактором (рисунок).

Измерения микроклиматических параметров показали, что температура воздуха в рабочей зоне изменялась в диапазоне от 19,2 до 24,1 °С, при среднем значении 21,8 °С. Относительная влажность воздуха составляла в среднем 46 %, при минимальном значении 39 % и максимальном 54 %. Скорость движения воздуха находилась в диапазоне 0,12–0,28 м/с. Полученные значения соответствовали допустимым нормативным диапазонам, однако в отдельные периоды времени наблюдались локальные отклонения, связанные с изменением режимов работы вентиляционных систем.

Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных позволила определить характер распределения контролируемых параметров и выявить наиболее значимые факторы риска. Анализ показал, что наибольший вклад в формирование потенциальной опасности для персонала в рассматриваемых условиях вносит аэрозольная нагрузка, динамика которой характеризуется значительными колебаниями в течение рабочей смены. Расчет интегрального индекса воздействия неблагоприятных факторов показал значение 0,64 при условной шкале от 0 до 1, что свидетельствует о среднем уровне совокупного воздействия на персонал.

На основе полученных экспериментальных данных была проведена цифровая обработка информации с использованием программной среды MATLAB. В рамках анализа были построены временные зависимости изменения концентрации аэрозольных частиц, уровня шума и параметров микроклимата. Полученные графические зависимости позволили выявить устойчивую корреляцию между интенсивностью технологических операций и изменением параметров производственной среды. Коэффициент корреляции между производственной нагрузкой оборудования и концентрацией аэрозольных частиц составил 0,71, что указывает на значимую зависимость между указанными параметрами.

Дополнительно была выполнена оценка эффективности применения цифровых средств мониторинга параметров производственной среды. Для этого была смоделирована ситуация оперативного обнаружения превышения концентрации аэрозольных частиц с использованием системы непрерывного контроля. Расчет показал, что при использовании стандартных периодических измерений время выявления неблагоприятных условий может достигать 40–50 минут. При внедрении системы непрерывного цифрового мониторинга данный показатель сокращается до 6–8 минут. Таким образом, скорость реагирования на изменение параметров производственной среды увеличивается примерно в 6–7 раз.

В рамках исследования также была проведена оценка потенциального влияния внедрения цифровых систем мониторинга на уровень производственных рисков. Для этого был рассчитан индекс вероятности возникновения неблагоприятных условий труда. Исходное значение данного показателя для рассматриваемого производственного участка составляло 0,37. После моделирования применения цифровых средств контроля и предложенных организационно-технических мероприятий данный показатель снижался до уровня 0,24, что соответствует уменьшению вероятности возникновения неблагоприятных условий примерно на 35 %.

Полученные результаты позволили также оценить влияние предложенных решений на экологическую составляющую производственной деятельности. На основе анализа динамики концентрации аэрозольных частиц было установлено, что своевременное выявление участков повышенного пылеобразования и оперативная корректировка режимов работы оборудования позволяют снизить среднюю концентрацию аэрозольных частиц в рабочей зоне на 18–22 %. В расчетной модели среднее значение данного показателя уменьшилось с 3,4 до 2,7 мг/м³.

Дополнительный анализ показал, что использование интегрированной цифровой системы мониторинга позволяет существенно повысить информированность персонала о текущем состоянии производственной среды. В ходе моделирования было установлено, что внедрение автоматизированной системы передачи данных на операторскую панель обеспечивает обновление информации о параметрах производственной среды каждые 60 секунд. В результате время принятия управленческих решений сокращается с 15–20 минут до 3–5 минут.

Отдельное внимание было уделено оценке устойчивости предложенных решений к возможным изменениям производственной нагрузки. Проведенные расчетные эксперименты показали, что при увеличении интенсивности технологических операций на 15 % средняя концентрация аэрозольных частиц может возрастать до 4,1 мг/м³. Однако применение системы оперативного цифрового мониторинга и корректировки режимов работы вентиляционного оборудования позволяет ограничить рост данного показателя до уровня 3,3 мг/м³.

В целом проведенные исследования показали, что использование цифровых технологий мониторинга параметров производственной среды и интеграция соответствующих информационных решений в систему производственного контроля позволяют повысить уровень промышленной и экологической безопасности персонала. Полученные результаты подтверждают возможность практического применения предложенного

комплекса мер на отдельных производственных участках без необходимости масштабной модернизации технологической инфраструктуры.

Анализ совокупности полученных данных свидетельствует о том, что внедрение цифровых средств мониторинга и оперативного анализа параметров производственной среды обеспечивает более эффективное управление факторами риска, связанными с воздействием неблагоприятных производственных факторов. Это позволяет повысить уровень защищенности персонала, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и уменьшить негативное воздействие промышленного производства на окружающую среду.

Выводы. В работе рассмотрены современные подходы к повышению уровня промышленной и экологической безопасности в условиях цифровой трансформации промышленности. Проведенный анализ показал, что внедрение цифровых технологий мониторинга, интеллектуальных систем обработки данных и автоматизированных средств контроля позволяет существенно повысить эффективность управления технологическими процессами и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Особое значение имеет интеграция датчиков, систем промышленного интернета вещей и аналитических платформ, обеспечивающих оперативное выявление отклонений в работе оборудования и своевременное принятие управленческих решений.

Полученные результаты подтверждают, что комплексное использование технологических, организационных и информационных мер является одним из наиболее перспективных направлений развития систем промышленной безопасности. Применение методов цифрового анализа данных способствует повышению точности оценки производственных рисков, оптимизации процедур производственного контроля и снижению негативного воздействия производственных процессов на окружающую среду.

Таким образом, внедрение комплексных цифровых решений позволяет повысить устойчивость функционирования промышленных предприятий, обеспечить более высокий уровень защиты персонала и окружающей среды, а также создать основу для дальнейшего развития интеллектуальных систем управления безопасностью производства. Перспективы дальнейших исследований связаны с совершенствованием методов анализа данных, развитием цифровых платформ управления и расширением возможностей интеграции различных информационных систем в единую инфраструктуру промышленной безопасности.

Список литературы/References

1. Quantifying the vertical water exchange of dominant tree species in a reclaimed landscape in the Athabasca oil sands region, Alberta / S. Fettah, R.M. Petrone, M.C. Elmes, J.S. Price // Ecohydrology. 2023. V. 16. No. 1. https://doi.org/10.1002/eco.2476

2. Methods for Improving the Efficiency of Electric Power Systems / R. Nussipali [et al.] // Electricity. 2024. Vol. 5, No. 4. P. 931–946. DOI: 10.3390/electricity5040047.

3. Spanidis P.-M., Roumpos C., Pavloudakis F. Evaluation of Strategies for the Sustainable Transformation of Surface Coal Mines Using a Combined SWOT–AHP Methodology // Sustainability. 2023. V. 15. https://doi.org/10.3390/su15107785.

4. Tree-level landscape transitions and changes in carbon storage throughout the mine life cycle / G. Yang [et al.] // Science of the Total Environment. 2023. V. 905. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166896.

5. The uncertain future of mountaintop-removal-mined landscapes: Modeling the influence of topography and vegetation / S.J. Bower, C.M. Shobe, A.E. Maxwell, B. Campforts // Geomorphology. 2024. V. 446. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108985.

6. Simulation Modeling of Energy Efficiency of Electric Dump Truck Use Depending on the Operating Cycle / A.F. Pryalukhin [et al.] // World Electric Vehicle Journal. 2025. V. 16, No. 4. Article 217. DOI: 10.3390/wevj16040217.

7. O'Donnell M.S., Whipple A.L., Inman R.D., Tarbox B.C., Monroe A.P., Robb B.S., Aldridge C.L. Remote Sensing for Monitoring Mine Lands and Recovery Efforts // US Geological Survey Circular. 2024. No. 1525. https://doi.org/10.3133/cir1525.

8. The influence of diamond-mining industry waste on soil geochemistry and the development of salinization processes / T. Vasileva, Y. Legostaeva, O. Shadrinova, E. Ivanov // Frontiers in Environmental Science. 2025. V. 13. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1660339.

9. Technosols for Mine Restoration: Overcoming Challenges and Maximising Benefit / T. Rodríguez-Espinosa [et al.] // Applied Sciences. 2025. V. 15. https://doi.org/10.3390/app152111664.

10. Morphological Features of Polycrystalline CdS1−xSex Films Obtained by Screen-Printing Method / D.M. Strateichuk [et al.] // Crystals. 2023. V. 13. 825 p. DOI: 10.3390/cryst13050825

Юдаев Игорь Викторович, д-р техн. наук, проф., etsh1965@mail.ru, Россия, Москва, Московский педагогический государственный университет,

Гамага Варвара Валерьевна, канд. биол. наук, доц., vv.gamaga@mpgu.su, Россия, Москва, Московский педагогический государственный университет,

Серёгина Виктория Викторовна, канд. техн. наук, доц., vic.victora@yandex.ru, Россия, Зерноград, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде,

Удинцова Надежда Михайловна, канд. техн. наук, доц., udinczowa@yandex.ru, Россия, Зерноград, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде

Получена редакцией 14.11.2025. Получена после рецензии 18.01.2026. Принята к печати 31.03.2026

DIGITAL METHODS FOR ENSURING INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF PRODUCTION SYSTEMS

I.V. Yudaev, V.V. Gamaga, V.V. Seregina, N.M. Udintsova

The article examines modern approaches to ensuring industrial and environmental safety of production systems in the context of industrial digital transformation. The study analyzes the possibilities of using digital monitoring technologies, automated control systems, and intelligent data processing methods to improve the efficiency of production management. Particular attention is paid to the application of industrial Internet of Things technologies and analytical platforms that enable the collection and processing of large volumes of technological data. It is shown that the integration of digital tools into industrial control systems allows timely detection of equipment deviations, reduction of production risks, and minimization of negative environmental impacts. The study concludes that comprehensive approaches combining technological, organizational, and information solutions are necessary to improve the reliability and safety of industrial enterprises.

Key words: industrial digitalization, industrial safety, environmental safety, industrial internet of things, data analytics, production risk management

Yudaev Igor Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, etsh1965@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State Pedagogical University,

Gamaga Varvara Valerievna, candidate of biological sciences, associate professor, vv.gamaga@mpgu.su, Russia, Moscow, Moscow State Pedagogical University,

Seregina Victoria Victorovna, candidate of sociological sciences, associate professor, vic.victora@yandex.ru, Russia, Zernograd, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Don State Agrarian University in Zernograd,

Udintsova Nadezhda Mikhailovna, candidate of technical sciences, associate professor, udinczowa@yandex.ru, Russia, Zernograd, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Don State Agrarian University in Zernograd

Received: 14.11.2025. Revised: 18.01.2026. Accepted: 31.03.2026