ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18
УДК 622.4:622.8

Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах

С.В. Баловцев
Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация
balovcev@yandex.ru

Аннотация
Устойчивая тенденция перехода к осложнению горно-геологических факторов при подземной добыче угля и одновременно при этом процессы повышения интенсификации горных работ вызывают рост динамических проявлений природных факторов горного производства, таких как внезапные выбросы угля и газа, горные удары, обрушения пород, приводящие к взрывам газа и пыли, пожарам. Это приводит к необходимости разрабатывать модели рисков проявления разных явлений, что позволяет повысить технологическую безопасность горного предприятия. В представленном исследовании на основе методологии оценки аэрологических рисков в угольных шахтах проведен структурный анализ аэрологических рисков. Сформированы критерии опасности горно-геологических и горнотехнических факторов и уязвимости схем и способов вентиляции, а также вентиляционных сооружений и вентиляторов главного проветривания. Разработана иерархическая структура аэрологических рисков высших рангов. Представленная структура рисков позволяет для каждой шахты и отдельных ее объектов определить область пересечения опасных факторов угледобычи и уязвимости систем вентиляции, а также количественно оценить эти области в виде аэрологических рисков. Установлены диапазоны значений аэрологического риска высших рангов для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа, для разных вентиляционных режимов. Представленная методология позволяет осуществлять прогнозирование и снижение аэрологических рисков при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт.

Ключевые слова
угольная шахта, методология обеспечения аэрологической безопасности, иерархическая структура рисков, ранги аэрологических рисков, метан, угольная пыль, критерии опасности, уязвимость схем вентиляции

Для цитирования
Balovtsev S.V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(4):310–319. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Higher rank aerological risks in coal mines

S.V. Balovtsev
National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
balovcev@yandex.ru

Abstract
The steady trend of complication of mining and geological factors in underground coal mining and at the same time the processes of mining intensification cause growth of dynamic manifestations of natural factors of mining, such as sudden coal and gas outbursts, rock bursts, rock collapses, leading to gas and dust explosions and fires. This requires developing the models of different phenomena manifestation risks, which enable improving the process safety of a mining enterprise. In this study, based on the methodology of aerological risk assessment in coal mines, a structural analysis of aerological risks was carried out. The criteria of hazard of mining-geological and mine engineering factors and vulnerability of schemes and methods of ventilation, ventilation facilities, and main fans were developed. A hierarchical structure of aerological risks of higher ranks was developed. The presented risk structure allows determining the area of superposition of hazards of coal mining and vulnerability of ventilation systems for each mine and its individual facilities, as well as

© Баловцев С. В., 2022

quantifying these areas in the form of aerological risks. The ranges of aerological risk values of higher ranks for super-category mines and mines hazardous by sudden coal and gas outbursts for different ventilation modes were established. The presented methodology enables forecasting and reducing aerological risks in course of designing, operation, liquidation, and conservation of coal mines.

Keywords
coal mine, aerological safety methodology, hierarchical risk structure, aerological risk ranks, methane, coal dust, hazard criteria, vulnerability of ventilation systems

For citation
Balovtsev S.V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2022;7(4):310–319. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18

Введение

Проблема обеспечения аэрологической безопасности угольных шахт носит комплексный, системный характер, решение которой связано с эффективностью реализации на практике взаимосвязанного комплекса технических, технологических, инженерных и информационных систем, производственных мероприятий и персонала, направленных на снижение не только уровня аэрологического риска, но и других видов риска, таких как геотехнические, геомеханические, гидрогеологические, организационно-технические [1–3].

Основными опасностями в угольных шахтах являются пылевая и газовая, они приводят к наиболее тяжелым видам аварий – взрывам газа и пыли, пожарам [4, 5]. В последние годы в Российской Федерации и за рубежом ведутся интенсивные поиски новых, более эффективных средств и способов взрывозащиты горных выработок, отвечающих современным требованиям и техническим возможностям [6–8].

В результате этих исследований с помощью численного моделирования более глубоко изучены следующие направления:

– распределение метана в зонах интенсивного ведения горных работ в угольных шахтах [9–11];

– свойства многокомпонентных взрывоопасных газовоздушных смесей в шахтной атмосфере [12];

– процессы осаждения угольной пыли в горных выработках [13, 14].

В современных условиях высоких нагрузок на очистные забои для обеспечения безопасности высокопроизводительных лав проводится интенсивная внутрипластовая дегазация шахт на примере шахты им. С.М. Кирова (Ленинск-Кузнецкий) [15]. В работах [16, 17] представлены успешные решения по дегазации выемочных полей шахт и снижения пылеобразования в лавах.

В условиях разработки высокогазоносных угольных пластов, опасных по пылевому фактору, обеспечить аэрологическую безопасность без применения дегазации и технологий обеспылевания угольных пластов невозможно [18, 19]. Однако основным средством борьбы с газовой и пылевой опасностью в угольных шахтах по-прежнему остается вентиляция. При внезапной остановке вентилятора главного проветривания в газовых шахтах, если невозможно включить резервный вентилятор, необходимо прекратить все работы на участках, снять напряжение с электрооборудования, вывести по истечении 30 мин всех людей к воздухоподающему стволу, а при неисправностях, для устранения которых требуется много времени, вывести людей на поверхность. Поэтому для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах вопросы оценки и анализа аэродинамических параметров воздушных потоков требуют постоянного исследования [20–22]. Необходимо проводить расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по количественным параметрам, направлениям проветривания, фактору тепловой депрессии [23]. Аспекты аэрологической безопасности, основанные на количественных оценках рисков аварий, находят свои приложения в реализации проектов цифровой трансформации и интеллектуализации горнотехнических систем [24, 25]. Это, в свою очередь, определяет перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт [26, 27], позволяет разрабатывать эволюционные модели системы безопасности угольных шахт на основе многофакторного моделирования, в том числе с использованием интеллектуальных алгоритмов и методов [28, 29].

Методология оценки аэрологических рисков

Для успешного решения множества проектных и производственных вопросов, связанных с обеспечением аэрологической безопасности угольных шахт на должном уровне, необходимы анализ и обработка больших потоков структурированной информации, взаимоувязанных между собой иерархически и представляющих собой некую информационную архитектуру аэрологической безопасности. Для этой архитектуры должны быть прописаны критерии опасности для системы в целом и уязвимости ее элементов, в соответствии с которыми разрабатываются инженерно-технические решения по предотвращению воздействия опасных горно-геологических и горнотехнических факторов угледобычи. Конечной целью построения архитектуры аэрологической безопасности являются количественная оценка аэрологической безопасности и определение путей ее совершенствования.

Одной из количественных характеристик аэрологической безопасности являются аэрологические риски, которые выражают вероятностную меру опасности возникновения аварий из-за неудовлетворительного состава шахтной атмосферы, реализуемых для схем вентиляции определенной уязвимости. В результате проведенных исследований были сформированы критерии опасности и уязвимости в структуре

аэрологических рисков, охватывающих всю архитектуру аэрологической безопасности. Это дало возможность объединить все проведенные исследования и количественно оценить как аэрологическую безопасность шахты в целом, так и отдельные ее элементы.

Иерархическая структура аэрологических рисков создавалась от частного к общему по принципу «снизу вверх» от отдельных объектов шахты до шахты в целом. Для этого вся шахта была поделена на три области по уровню функционирования ее объектов. Сначала была разработана концепция аэрологических рисков для выемочных участков и подготовительных выработок, которые в системе рангов заняли нижнее положение и стали определяться как риски III ранга. Аэрологические риски отказов, которые могут привести к авариям в пределах крыльев шахт, заняли среднее положение в структуре рангов и стали определяться как риски II ранга. Аэрологические риски отказов, которые могут привести к авариям для всей шахты, заняли высшее положение в структуре рангов и стали определяться как риски I ранга.

Аэрологические риски III ранга исследованы в более ранних работах автора, в результате этих исследований были разработаны:

– иерархическая структура рисков этого ранга;

– критерии опасности факторов и уязвимости схем вентиляции на уровне участков и подготовительных выработок;

– методики оценки аэрологических рисков для выемочных участков и для подготовительных выработок;

– методика расчета прогнозируемых значений риска при использовании мероприятий по управлению газовыделением с помощью дегазации высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли;

а также:

– получено количественное сравнение рисков загазирования выработок при различных схемах вентиляции; оценено влияние аэродинамического старения выработок на риски участковых и капитальных горных выработок с различными способами их охраны;

– выполнены расчеты значений аэрологических рисков III ранга для ряда шахт Кузнецкого бассейна.

Поскольку структура рисков III ранга уже приведена в предыдущих публикациях автора, то необходимо более подробно остановиться на структуре рисков I и II рангов.

Показатели опасности и уязвимости в структуре рисков I и II рангов

Принципиальная схема построения структур всех рангов одинакова, используется почти один и тот же набор опасных факторов горного производства, но области воздействия этих факторов на каждом уровне разные. Это делает необходимым устанавливать разные виды и уровни уязвимости вентиляции и, соответственно, разные уровни негативных последствий отказов вентиляции. Основными показателями опасности в структуре аэрологических рисков всех рангов являются газовая и пылевая, а также температура горных пород. Оценка взрывоопасности угольных шахт включает оценку взрывчатых свойств многокомпонентных газопылевоздушных смесей, содержащих тяжелые углеводороды в шахтной атмосфере. Для оценки рисков II ранга выбирается самый опасный пласт крыла шахты, для рисков I ранга – самый опасный пласт шахты.

Аэрологический риск I ранга $R_{\alpha ш}$ рассчитывается по формуле

$$R_{\alpha ш} = \lambda_ш \nu_ш, \quad (1)$$

где $\lambda_ш$ – коэффициент опасности возникновения аварии для шахты; $\nu_ш$ – коэффициент уязвимости вентиляции шахты;

$$\lambda_ш = (\delta_{пш} q_{пш} + \delta_{гш} q_{гш})\lambda_0, \quad (2)$$

где $\delta_{пш}$ – коэффициент значимости пылевого фактора для шахты; $q_{пш}$ – значение кода показателя опасности шахтопластов по удельному пылевыделению; $\delta_{гш}$ – коэффициент значимости газового фактора для шахты; $q_{гш}$ – значение кода показателя опасности шахты по относительной газообильности; λ_0 – нормирующий множитель;

$$\nu_ш = (\varphi_{св}\alpha_{св} + \varphi_{сп}\alpha_{сп} + \varphi_{вгп}\alpha_{вгп})\nu_0, \quad (3)$$

где $\varphi_{св}$ – коэффициент значимости уязвимости схемы вентиляции шахты; $\alpha_{св}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты; $\varphi_{сп}$ – коэффициент значимости уязвимости способа вентиляции шахты; $\alpha_{сп}$ – значение кода уязвимости способа вентиляции шахты; $\varphi_{вгп}$ – коэффициент значимости уязвимости вентиляторов главного проветривания шахты; $\alpha_{вгп}$ – значение кода уязвимости вентиляторов главного проветривания шахты; ν_0 – нормирующий множитель.

Раскладывая значения показателей в формуле (3), имеем:

$$\varphi_{св} = (\varphi_{свд}\alpha_{свд} + \varphi_{свн}\alpha_{свн} + \varphi_{сву}\alpha_{сву})\nu_1, \quad (4)$$

где $\varphi_{свд}$ – коэффициент значимости влияния величины депрессии шахты на уязвимость схемы вентиляции шахты; $\alpha_{свд}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты в зависимости от величины ее депрессии; $\varphi_{свн}$ – коэффициент значимости степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\alpha_{свн}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты в зависимости от степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\varphi_{сву}$ – коэффициент значимости влияния устойчивости проветривания на уязвимость схемы вентиляции шахты; $\alpha_{сву}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции в зависимости от устойчивости проветривания шахты; ν_1 – нормирующий множитель;

$$\varphi_{сп} = \varphi_{спз}\alpha_{спз}\nu_2, \quad (5)$$

где $\varphi_{спз}$ – коэффициент значимости степени влияния способа вентиляции на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; $\alpha_{спз}$ – значение кода уязвимости степени влияния способа вентиляции на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; ν_2 – нормирующий множитель;

$$\varphi_{вгп} = (\varphi_{вгпу}\alpha_{вгпу} + \varphi_{вгпо}\alpha_{вгпо} + \varphi_{вгпв}\alpha_{вгпв})\nu_3, \quad (6)$$

где $\varphi_{вгпу}$ – коэффициент значимости степени влияния устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания; $\alpha_{вгпу}$ – значение кода степени влияния устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания; $\varphi_{вгпо}$ – коэффициент значимости степени обеспеченности шахты воздухом; $\alpha_{вгпо}$ – значение кода значимости степени обеспеченности шахты воздухом; $\varphi_{вгпв}$ – коэффициент значимости величины внешних утечек воздуха; $\alpha_{вгпв}$ – значение кода значимости величины внешних утечек воздуха; v_3 – нормирующий множитель.

Представленные показатели опасности и уязвимости в структуре рисков I ранга иерархически увязаны в функциональную систему, отраженную на рис. 1.

Уязвимость вентиляции на уровне рисков I ранга включает: уязвимость схем и способов вентиляции шахт и уязвимость вентиляторов главного проветривания. Уязвимость схем вентиляции шахт определяется: величиной депрессии шахты, степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания шахты. Уязвимость способов вентиляции на уровне рисков I ранга включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания.

Уязвимость вентиляторов главного проветривания определяется: устойчивостью совместной работы вентиляторов главного проветривания, степенью обеспеченности шахты воздухом, величиной внешних утечек воздуха.

Уязвимость вентиляции на уровне рисков II ранга включает: уязвимость схем и способов вентиляции крыльев шахт и уязвимость вентиляционных сооружений. В свою очередь, уязвимость схем вентиляции крыльев шахты определяется: величиной депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков, которая зависит от вида штрека (полевой, пластовый), способа охраны (целик-целик, целик-выработанное пространство, выработанное пространство-выработанное пространство); степенью влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; устойчивостью проветривания крыла шахты; величиной тепловой депрессии наклонных выработок.

Уязвимость способов вентиляции на уровне рисков II ранга включает: степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания. Уязвимость вентиляционных сооружений определяется степенью их влияния на устойчивость проветривания.

Аэрологический риск II ранга рассчитывается по формуле

$$R_{\alpha кш} = \lambda_{кш} v_{кш}, \quad (7)$$

где $\lambda_{кш}$ – коэффициент опасности возникновения аварии для крыла шахты; $v_{кш}$ – коэффициент уязвимости вентиляции крыла шахты;

$$\lambda_{кш} = (\delta_{пкш} q_{пкш} + \delta_{гкш} q_{гкш}) \lambda_{0кш}, \quad (8)$$

где $\delta_{пкш}$ – коэффициент значимости пылевого фактора для крыла шахты; $q_{пкш}$ – значение кода показателя опасности шахтопластов по удельному пылевыделению для крыла шахты; $\delta_{гкш}$ – коэффициент значимости газового фактора для крыла шахты; $q_{гкш}$ – значение кода показателя опасности шахты по относительной газообильности для крыла шахты; $\lambda_{0кш}$ – нормирующий множитель;

$$v_{кш} = (\varphi_{свк}\alpha_{свк} + \varphi_{спк}\alpha_{спк} + \varphi_{вск}\alpha_{вск}) v_{1к}, \quad (9)$$

где $\varphi_{свк}$ – коэффициент значимости уязвимости схемы вентиляции крыла шахты; $\alpha_{свк}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции крыла шахты; $\varphi_{спк}$ – коэффициент значимости уязвимости способа вентиляции шахты; $\alpha_{спк}$ – значение кода уязвимости способа вентиляции крыла шахты; $\varphi_{вск}$ – коэффициент значимости уязвимости вентиляционных сооружений крыла шахты; $\alpha_{вск}$ – значение кода уязвимости вентиляционных сооружений крыла шахты; $v_{1к}$ – нормирующий множитель.

Раскладывая значения показателей в формуле (9), имеем:

$$\varphi_{свк} = (\varphi_{свкд}\alpha_{свкд} + \varphi_{свкн}\alpha_{свкн} + \varphi_{свку}\alpha_{свку} + \varphi_{свкт}\alpha_{свкт}) v_{2к}, \quad (10)$$

где $\varphi_{свкд}$ – коэффициент значимости влияния величины депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков; $\alpha_{свкд}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции крыла шахты в зависимости от величины депрессии откаточного и вентиляционного магистральных штреков; $\varphi_{свкн}$ – коэффициент значимости степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\alpha_{свкн}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции шахты в зависимости от степени влияния направления движения свежей и исходящих струй на утечки воздуха; $\varphi_{свку}$ – коэффициент значимости влияния устойчивости проветривания на уязвимость схемы вентиляции крыла шахты; $\alpha_{свку}$ – значение кода уязвимости схемы вентиляции крыла шахты в зависимости от устойчивости проветривания; $\varphi_{свкт}$ – коэффициент значимости величины тепловой депрессии наклонных выработок; $\alpha_{свкт}$ – значение кода значимости величины тепловой депрессии наклонных выработок; $v_{2к}$ – нормирующий множитель;

$$\varphi_{спк} = \varphi_{спзк}\alpha_{спзк} v_{3к}, \quad (11)$$

где $\varphi_{спзк}$ – коэффициент значимости степени влияния способа вентиляции крыла шахты на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; $\alpha_{спзк}$ – значение кода уязвимости степени влияния способа вентиляции крыла шахты на загазирование выработок при внезапной остановке вентилятора главного проветривания; $v_{3к}$ – нормирующий множитель;

$$\varphi_{вск} = \varphi_{вск}\alpha_{вск} v_{4к}, \quad (12)$$

где $\varphi_{вск}$ – коэффициент значимости степени влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания; $\alpha_{вск}$ – значение кода степени влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания; $v_{4к}$ – нормирующий множитель.

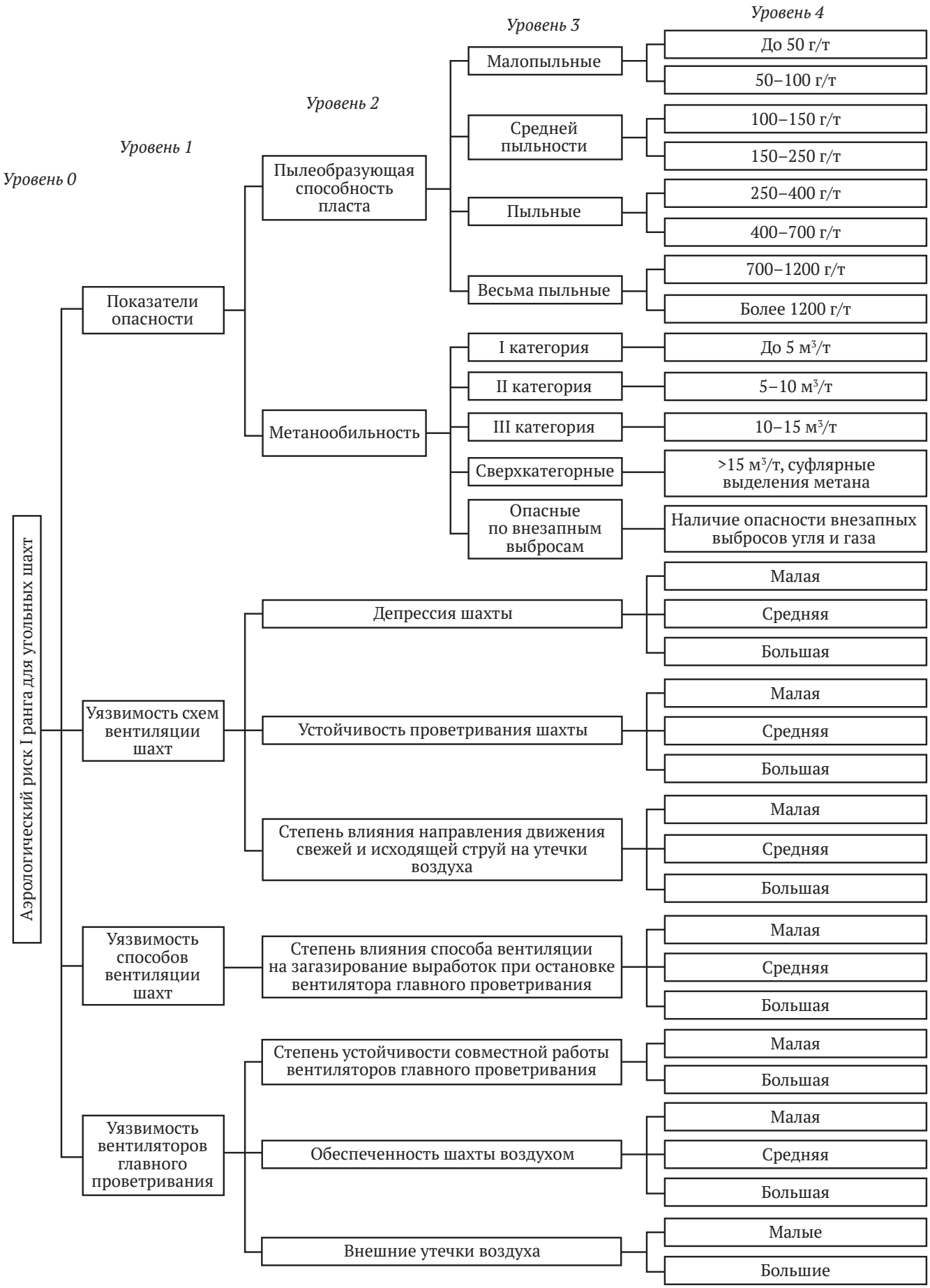

Рис. 1. Иерархическая структура аэрологического риска I ранга

Представленные показатели опасности и уязвимости в структуре рисков II ранга иерархически представлены в виде функциональной схемы, отраженной на рис. 2.

Таким образом, представленная методология конструирования архитектуры аэрологической безопасности, включающая оценки аэрологических рисков, позволяет количественно оценить эффективность различных способов совершенствования шахтной вентиляции.

Результаты исследований

За основу количественной оценки опасности, уязвимости, аэрологического риска принят известный подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю уязвимости (аэрологического риска) схем и способов вентиляции шахты (крыла шахты) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу. Для шахты это центрально-сдвоенная схема вентиляции, нагнетательный способ проветривания, усугубляющиеся неблагоприятными условиями: схемы

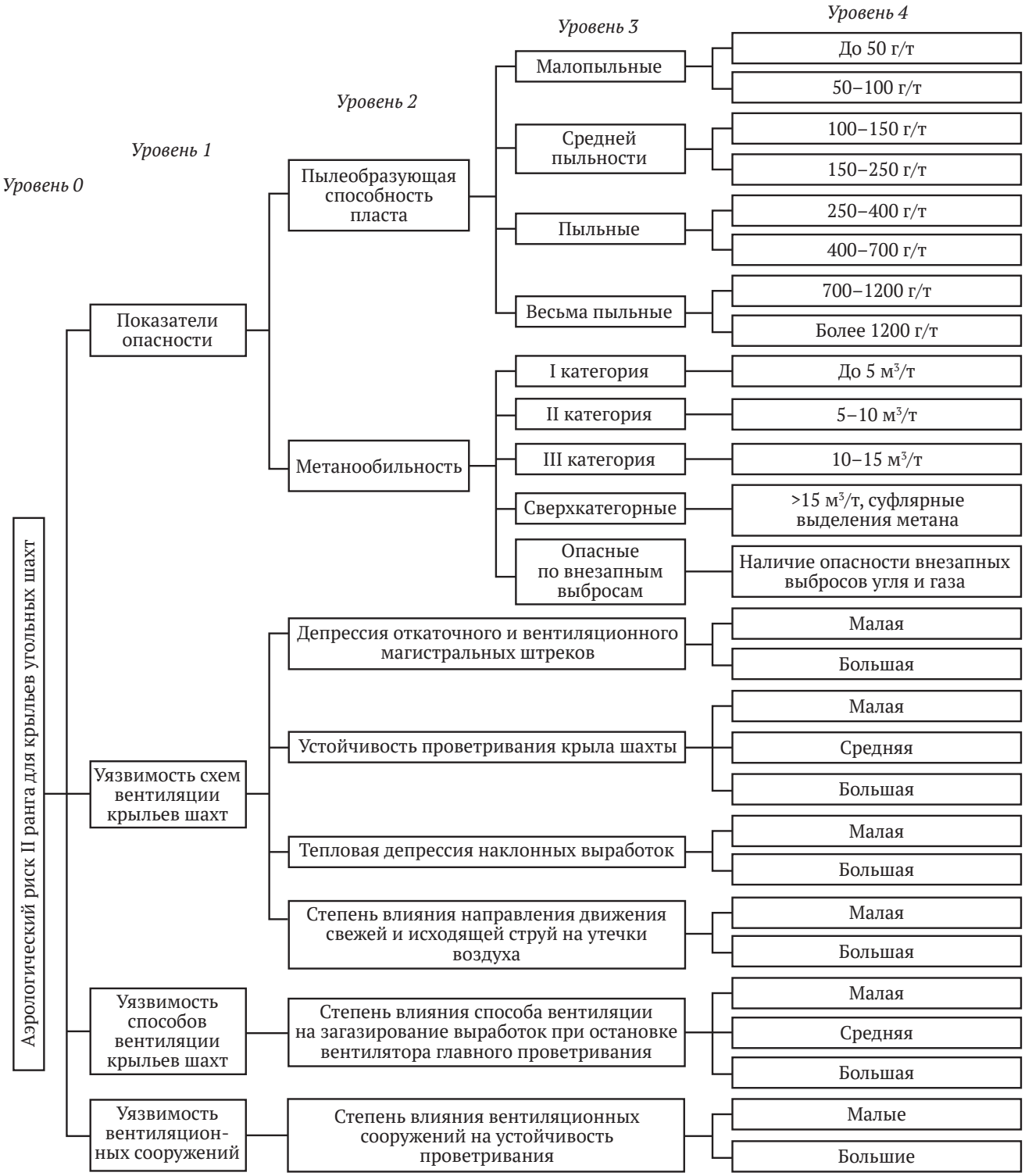

Рис. 2. Иерархическая структура аэрологического риска II ранга

с низкой степенью устойчивости (опрокидывание вентиляционной струи происходит при нормальной работе шахты – 3-я категория устойчивости), большая депрессия шахты, большая степень влияния направления движения свежей и исходящей струй на утечки воздуха; большая степень влияния способа вентиляции на загазирование выработок при остановке вентиляторов главного проветривания, низкая обеспеченность шахты воздухом, большие внешние утечки и др.

В табл. 1 приведены диапазоны значений аэрологического риска I ранга для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа, для разных вентиляционных режимов. Первая цифра диапазона значений риска отражает самые благоприятные условия: наименьшее пылевыделение, отсутствие диагоналей в вентиляционной сети, прямоточная схема движения воздуха, малая депрессия шахты, устойчивая совместная работа вентиляторов главного проветривания, наличие резерва шахты по воздуху, малые внешние утечки и т.п.

Анализ расчетных данных показывает, что, если риски для различных схем и способов вентиляции возрастают от лучших к худшим условиям в 2,1 раза (0,152/0,078), то от значений вентиляционных параметров величина риска зависит в большей степени и составляет его увеличение в 6,8 раза (0,535/0,078). Аналогичная зависимость прослеживается и для рисков II ранга (табл. 2).

Необходимо отметить, что методология позволяет выделить из структуры рисков наиболее значимые элементы (вентиляционные показатели) и разработать инженерно-технические мероприятия по снижению аэрологических рисков и повышению эффективности аэрологической безопасности.

Таблица 1

Значения аэрологического риска I ранга для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа

Схема и способ проветривания	Значения аэрологического риска I ранга		
	1-я категория устойчивости	2-я категория устойчивости	3-я категория устойчивости
Фланговая схема, всасывающий способ	0,078–0,535 0,093–0,611	0,101–0,575 0,121–0,657	0,203–0,733 0,242–0,838
Фланговая схема, комбинированный способ	0,083–0,545 0,098–0,623	0,105–0,595 0,125–0,68	0,224–0,756 0,267–0,864
Фланговая схема, нагнетательный способ	0,087–0,556 0,104–0,635	0,108–0,615 0,129–0,703	0,245–0,78 0,292–0,891
Комбинированная схема, всасывающий способ	0,088–0,571 0,105–0,653	0,109–0,647 0,129–0,739	0,237–0,786 0,282–0,898
Комбинированная схема, комбинированный способ	0,1–0,599 0,119–0,685	0,133–0,685 0,159–0,783	0,262–0,808 0,313–0,923
Комбинированная схема, нагнетательный способ	0,111–0,627 0,133–0,717	0,159–0,724 0,189–0,827	0,288–0,83 0,344–0,948
Центрально-сдвоенная схема, всасывающий способ	0,105–0,614 0,126–0,702	0,179–0,715 0,213–0,817	0,3–0,832 0,357–0,951
Центрально-сдвоенная схема, комбинированный способ	0,129–0,635 0,154–0,726	0,198–0,74 0,236–0,846	0,312 – 0,853 0,372 – 0,975
Центрально-сдвоенная схема, нагнетательный способ	0,152–0,656 0,182–0,75	0,217–0,766 0,259–0,875	0,325 – 0,875 0,388 – 1,000

Примечание. В числителе приведены значения риска для сверхкатегорийных шахт, в знаменателе – для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа.

Таблица 2

Значения аэрологического риска II ранга для сверхкатегорийных шахт и шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа

Схема и способ проветривания	Значения аэрологического риска II ранга		
	1-я категория устойчивости	2-я категория устойчивости	3-я категория устойчивости
Фланговая схема, всасывающий способ	0,078–0,429 0,093–0,49	0,127–0,543 0,151–0,621	0,244–0,659 0,291–0,753
Фланговая схема, комбинированный способ	0,088–0,48 0,105–0,548	0,141–0,589 0,168–0,673	0,258–0,707 0,308–0,808
Фланговая схема, нагнетательный способ	0,098–0,531 0,117–0,607	0,155–0,635 0,185–0,725	0,273–0,755 0,326–0,863
Центрально-сдвоенная схема, всасывающий способ	0,093–0,514 0,111–0,587	0,146–0,607 0,174–0,694	0,252–0,719 0,301–0,821
Центрально-сдвоенная схема, комбинированный способ	0,108–0,586 0,128–0,670	0,167–0,678 0,199–0,775	0,278–0,797 0,332–0,911
Центрально-сдвоенная схема, нагнетательный способ	0,122–0,658 0,145–0,752	0,188–0,749 0,224–0,856	0,304–0,875 0,362–1,000

Примечание. В числителе приведены значения риска для сверхкатегорийных шахт, в знаменателе – для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа.

Заключение

Устойчивая тенденция перехода условий угледобычи к осложнению горно-геологических факторов, связанных с ростом глубины горных работ и температуры горных пород, а также одновременная при этом интенсификация горных работ с помощью современного высокопроизводительного оборудования вызывают рост динамических проявлений природных факторов горного производства, таких как внезапные выбросы угля и газа, горные удары, обрушения пород, приводящие к взрывам газа и пыли, пожарам. Это предъявляет дополнительные требования к формированию и функционированию архитектуры аэрологической безопасности угольных шахт, проявляющиеся в необходимости целостности оценки рисков как для шахты, так и для ее объектов, а следовательно, вытекающих из этого – гибкости, оперативности и взаимосвязанности принимаемых организационно-технических и технологических решений, возможности снижения уровня аэрологических рисков.

Таким требованиям обеспечения аэрологической безопасности отвечает иерархическая структура аэрологических рисков угольных шахт, которая позволяет для каждой шахты и отдельных ее объектов определить область пересечения опасных факторов угледобычи и уязвимости схем и способов вентиляции, а также вентиляционных сооружений и оценить количественно эти области в виде аэрологических рисков. Представленная методология позволяет осуществлять прогнозирование и снижение аэрологических рисков при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт.

Список литературы

1. Потапова Е.В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):52–60. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60

2. Куликова Е.Ю. Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2–1):124–133. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133

3. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;208:107433. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107433

4. Kabanov E.I., Korshunov G.I., Magomet R.D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2020;24(1):105–110. https://doi.org/10.6180/jase.202102_24(1).0014

5. Trinh L.H., Nguyen V.N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2021;6(4):233–240. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240

6. Забурдяев В.С. Прогноз и предотвращение рисков формирования взрывоопасных смесей в угольных шахтах. *Безопасность труда в промышленности*. 2019;(6):65–69. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-65-69

7. Shi L., Wang J., Zhang G. et al. A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;107:317–333. https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.02.023

8. Dmitrievich M.R., Alekseevich R.V., Borisovich S.V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1154–1161.

9. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;89:68–77. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.022

10. Yueze L., Akhtar S., Sasmito A.P., Kurnia J.C. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(4):657–662. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.019

11. Lolon S.A., Brune J.F., Bogin G.E., Juganda A. Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020;37(5):1437–1449. https://doi.org/10.1007/s42461-020-00287-6

12. Лебедев В.С., Скопинцева О.В. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность. *Горный журнал*. 2017;(4):84–86. https://doi.org/10.17580/gzh.2017.04.17

13. Филин А.Э., Курносов И.Ю., Колесникова Л.А. и др. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты. *Уголь*. 2022;(9):67–72. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72

14. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1917–1929.

15. Slastunov S., Kolikov K., Batugin A. et al. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin. *Energies*. 2022;15(3):1047. https://doi.org/10.3390/en15031047

16. Шулятьева Л.И., Майорова Л.В. Моделирование параметров и организация процесса дегазации выемочных полей угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(8):168–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_168

17. Kornev A.V., Korshunov G.I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: Problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):84–97. https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.07

18. Скопинцева О.В., Ганова С.Д., Демин Н.В., Папичев В.И. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах. *Горный журнал*. 2018;(11):97–100. https://doi.org/10.17580/gzh.2018.11.18

19. Скопинцева О.В., Вертинский А.С., Иляхин С.В. и др. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах. *Горный журнал*. 2014;(5):17–20.

20. Босиков И.И., Клюев Р.В., Аймбетова И.О., Махошева С.А. Оценка и анализ аэродинамических параметров воздушных потоков для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):397–405. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405

21. Yi H., Park J., Kim M.S. Characteristics of mine ventilation air flow using both blowing and exhaust ducts at the mining face. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020;34:1167–1174. https://doi.org/10.1007/s12206-020-0218-0

22. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007

23. Попов М.Д., Кормщиков Д.С., Семин М.А., Левин Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть». *Безопасность труда в промышленности*. 2020;(10):24–32. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-10-24-32

24. Тарасенко И.А., Куликова А.А., Ковалева А.М. К вопросу оценки автоматизации контроля параметров метановоздушной смеси. *Уголь*. 2022;(11):84–88. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88

25. Куликова Е.Ю., Конюхов Д.С. Мониторинг риска аварий при освоении подземного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):97–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97

26. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5–2):31–47. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_31

27. Казанин О.И., Мешков А.А., Сидоренко А.А. Перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–1):35–53. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_35

28. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;147:1193–1200. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.046

29. Nguyen Q.L., Nguyen Q.M., Tran D.T., Bui X.N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251

References

1. Potapova E.V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52-60. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60

2. Kulikova E.Yu. Methods of forming an integral risk assessment in mine and underground construction. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2–1):124–133. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133

3. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;208:107433. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107433

4. Kabanov E.I., Korshunov G.I., Magomet R.D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings. *Journal of Applied Science and Engineering*. 2020;24(1):105–110. https://doi.org/10.6180/jase.202102_24(1).0014

5. Trinh L.H., Nguyen V.N. Mapping coal fires using Normalized Difference Coal Fire Index (NDCFI): case study at Khanh Hoa coal mine, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):233–240. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-233-240

6. Zaburdayev V.S. Forecast and prevention of risks of explosive mixtures formation in the coal mines. *Occupational Safety in Industry*. 2019;(6):65–69. (In Russ.) https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-6-65-69

7. Shi L., Wang J., Zhang G. et al. A risk assessment method to quantitatively investigate the methane explosion in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;107:317–333. https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.02.023

8. Dmitrievich M.R., Alekseevich R.V., Borisovich S.V. Methodological approach to issue of researching dust-explosion protection of mine workings of coal mines. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1154–1161.

9. Hasheminasab F., Bagherpour R., Aminossadati S.M. Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;89:68–77. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.022

10. Yueze L., Akhtar S., Sasmito A.P., Kurnia J.C. Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(4):657–662. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.019

11. Lolon S.A., Brune J.F., Bogin G.E., Juganda A. Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2020;37(5):1437–1449. https://doi.org/10.1007/s42461-020-00287-6

12. Lebedev V.S., Skopintseva O.V. Residual coalbed gas components: composition, content, hazard. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(4):84–86. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2017.04.17

13. Filin A.E., Kurnosov I.Yu., Kolesnikova L.A. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'*. 2022;(9):67–72. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72

14. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):1917–1929.

15. Slastunov S., Kolikov K., Batugin A. et al. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin. *Energies*. 2022;15(3):1047. https://doi.org/10.3390/en15031047

16. Shulyatieva L.I., Mayorova L.V. Parametric modeling and arrangement of gas drainage in coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(8):168–179. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_168

17. Kornev A.V., Korshunov G.I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: Problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):84–97. https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.07

18. Skopintseva O.V., Ganova S.D., Demin N.V., Papichev V.I. Integrated method of dust and gas hazard reduction in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(11):97–100. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2018.11.18

19. Skopintseva O.V., Vertinsky A.S., Ilyakhin S.V. et al. Justification of rational parameters of dedusting treatment of coal mass in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(5):17–20. (In Russ.)

20. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Aimbetova I.O., Makhosheva S.Al. Assessment and analysis of aerodynamic parameters of air flows for effective selection of air supply schemes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):397–405. (In Russ.) https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405

21. Yi H., Park J., Kim M.S. Characteristics of mine ventilation air flow using both blowing and exhaust ducts at the mining face. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020;34:1167–1174. https://doi.org/10.1007/s12206-020-0218-0

22. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007

23. Popov M.D., Kormshchikov D.S., Semin M.A., Levin L.Yu. Calculation of air flows stability in the mine workings by the factor of thermal depression in the analytical complex "Aeroset". *Occupational Safety in Industry*. 2020;(10):24–32. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-10-24-32

24. Tarasenko I.A., Kulikova A.A., Kovaleva A.M. On the issue of assessing the automation of control of the parameters of the methane-air mixture. *Ugol'*. 2022;(11):84–88. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88

25. Kulikova E.Yu., Konyukhov D.S. Accident risk monitoring in underground space development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):97–103. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97

26. Zakharov V.N., Kubrin S.S. Digital transformation and intellectualization of mining systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5–2):31–47. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_31

27. Kazanin O. I., Meshkov A. A., Sidorenko A. A. Prospects for development of a technological structure of underground coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6–1):35–53. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_35

28. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;147:1193–1200. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.046

29. Nguyen Q.L., Nguyen Q.M., Tran D.T., Bui X.N. Prediction of ground subsidence due to underground mining through time using multilayer feed-forward artificial neural networks and back-propagation algorithm – case study at Mong Duong underground coal mine (Vietnam). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):241–251. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-241-251

Информация об авторе

Сергей Владимирович Баловцев – кандидат технических наук, доцент, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-0961-6050, Scopus ID 56780405300; e-mail balovcev@yandex.ru

Information about the author

Sergey V. Balovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-0961-6050, Scopus ID 56780405300; e-mail balovcev@yandex.ru

Поступила в редакцию	17.08.2022	**Received**	17.08.2022
Поступила после рецензирования	14.11.2022	**Revised**	14.11.2022
Принята к публикации	01.09.2022	**Accepted**	01.09.2022