

КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ УГЛЕДОБЫЧИ В ВЕДУЩИХ СТРАНАХ МИРА

И.О. Федоткин

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Аннотация: Исследование основано на анализе статистических данных по травматизму и аварийности в ведущих угледобывающих странах за 2013–2023 гг., включая Китай, Индию, Россию и США. Основное внимание уделено анализу динамики показателей смертельного травматизма, его уровней при подземной и открытой добыче, причинам травматизма и структуре аварийности, а также применяемым мерам по предотвращению пожаров и взрывов. Выявлено, что, несмотря на продолжающийся рост мирового потребления и добычи угля, достигшей в 2023 г. рекордных 8,97 млрд т, среди ведущих угледобывающих стран мира, таких как Китай, Индия, США и Россия, наблюдается общий тренд снижения уровня смертельного травматизма. Значения коэффициента опасности подземных работ для России составляет 21,82, для Индии – 36,49, для США – 3,56. В США и Индии основными причинами большей части смертельного травматизма являются происшествия, связанные с механизацией работ и человеческим фактором. Взрывы газа в Китае приводят к наибольшему числу жертв – в среднем 7 чел. на один случай, а пожары, несмотря на меньшую распространенность (4,3% аварий), являются вторым по тяжести последствий видом аварий (в среднем 5,8 погибших на случай). В России, несмотря на сходную с Китаем структуру основных видов аварий, наблюдается самая высокая доля происшествий, связанных со взрывами газа, угольной пыли и пожарами (51,4% всех аварий), из которых 27,9% составляют пожары, а 23,5% – взрывы (горение) газа и угольной пыли.

Ключевые слова: добыча угля, смертельный травматизм, статистика пожаров, причины смертельного травматизма, пожары в шахтах, взрывы газа и пыли, виды аварий, подземные горные работы, обрушение пород, угледобывающая промышленность.

Для цитирования: Федоткин И. О. Ключевые факторы угледобычи в ведущих странах мира // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 153–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_153.

Key factors of coal mining in world's leading countries

I.O. Fedotkin

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com

Abstract: This research is based on the statistics of injuries and accidents in top coal-mining countries for 2013–2023, including China, India, Russia and the USA. The main attention is paid to the analysis of history of fatal injuries in open pit and underground mining, traumatism causes and structure of accidents, as well as to the fire and explosion prevention activities. It is found that, although the increase in the coal production and consumption in the world, with

a record of 8.97 Bt in 2023, the world's top coal-mining countries such as China, India, Russia and the USA show a general trend of decrease in the level of fatal injuries. The danger coefficient of coal mining is 21.82 in Russia, 36.49 in India and 3.56 in the USA. In the U.S. and India, the main causes of most fatal injuries are connected with operation mechanization and human factor. Gas explosions in China lead to the highest body count — 7 men per an event on the average, while fires, despite lower frequency (4.3% of accidents), are the number two type of accidents in terms of severity of consequences (5.8 casualties per an event on the average). In Russia, in spite of the similar structure of the main accidents as in China, there is the highest percentage of accidents connected with gas and coal dust explosions and fires (51,4% of all accidents), including 27.9% of fires and 23.5% of explosions (burning) of gas and coal dust.

Key words: coal mining, fatal injuries, fire statistics, fatal injuries causes, mine fires, gas and dust explosions, types of accidents, underground mining, rock failure, coal mining industry.

For citation: Fedotkin I. O. Key factors of coal mining in world's leading countries. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3):153-167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_153.

Введение

На сегодняшний день уголь является одним из важнейших источников энергии для промышленности, энергетики и жилого сектора, он обеспечивает около 27% мирового потребления первичной энергии и 35% мирового потребления электроэнергии, оставаясь самым распространенным топливом, применяемым

для ее генерации. Несмотря на постепенный переход на возобновляемые источники энергии, мировое потребление угля продолжает расти — согласно данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2023 г. оно достигло нового рекорда в 8,7 млрд т, увеличившись на 2,6% относительно показателя 2022 г. Особенно рост потребления угля

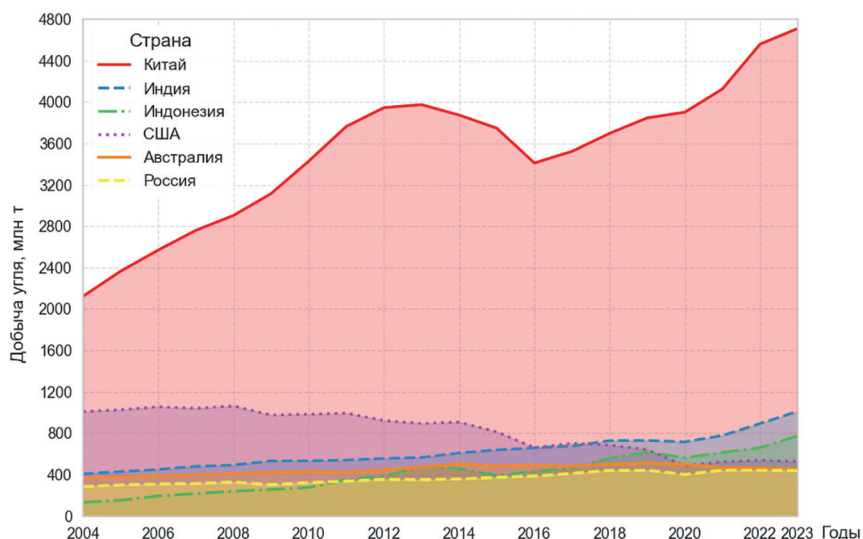


Рис. 1. Динамика добычи угля ведущими угледобывающими странами в 2004–2023 гг.

Fig. 1. Dynamics of coal production by leading coal producing countries in 2004–2023

наблюдается в Китае, где оно достигло 4883 млн т в 2023 г., а также в Индии — 1251 млн т [1].

В 2023 г. мировая добыча угля выросла на 3,1% по сравнению с 2022 г. и составила 8 970 млн т, что является историческим максимумом.

При этом 88,3% угля добывается в шести ведущих угледобывающих странах: Китае — 4710 млн т (52,51%), Индии — 1010,9 млн т (11,27%), Индонезии — 775,2 млн т (8,64%), США — 526,5 млн т (5,86%), Австралии — 455,8 млн т (5,08%), России — 438,7 млн т (4,89%) [1, 2]. Индия и Индонезия демонстрируют наибольшие темпы роста за период с 2013 по 2023 гг. — 78,64% и 63,33% соответственно. После падения добычи угля в 2016 г. Китай также увеличил добычу на 38,1% к 2023 г. (см. рис. 1). В России за данный период рост добычи составил 24,61% и, несмотря на замедление темпов после 2019 г. (в период пандемии и сложной геополитической обстановки), ожидается дальнейшее увеличение добычи угля.

Примечательно, что 75,8% мировых доказанных запасов угля, составляющих 1074 млрд т, располагаются в пяти странах, также лидирующих по текущим

Таблица 1

Перечень стран с крупнейшими доказанными запасами угля
List of countries with the largest proven coal reserves

№ п/п	Страна	Запасы угля, млн т	Доля от мирового запаса, %
1	США	248 941	23,2
2	Россия	162 166	15,1
3	Австралия	150 227	14,0
4	Китай	143 197	13,3
5	Индия	105 919	10,2
6	Германия	35 900	3,3
7	Индонезия	34 869	3,2
8	Польша	28 395	2,6
9	Казахстан	25 605	2,5

объемам добычи угля — США, России, Австралии, Китае и Индии (табл. 1).

Сопоставление текущих темпов добычи с имеющимися запасами (рис. 2) демонстрирует, что страны с наиболее интенсивной добычей характеризуются относительно низкой обеспеченностью запасами. Китай, будучи крупнейшим производителем угля в мире, при сохранении текущих темпов добычи может исчерпать свои запасы уже через 30,4 года, Индонезия — через 45 лет, а Индия —

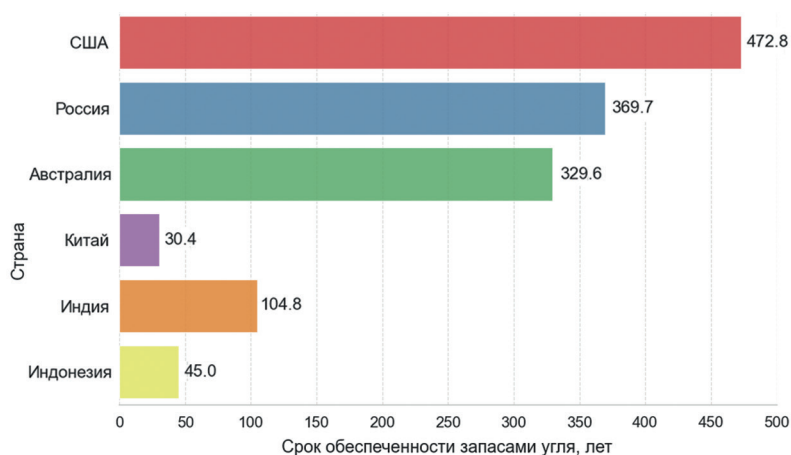


Рис. 2. Обеспеченность запасами угля ведущих угледобывающих стран при текущем уровне добычи
Fig. 2. Coal reserve sufficiency of leading coal-producing countries at current production rates

через 104,8 года. В то же время страны с более умеренными темпами добычи, такие как США, Россия и Австралия, обладают значительно большими запасами угля, обеспечивающими при современных темпах добычи разработку месторождений на 472,8, 369,7 и 329,6 лет соответственно.

Такое соотношение между запасами и объемами добычи в условиях устойчивого роста мирового потребления угля создает предпосылки для интенсификации горных работ в странах с большей обеспеченностью запасами, поскольку постепенное истощение ресурсной базы в таких странах, как Китай и Индонезия, потребует перераспределения производственных мощностей в пользу стран с более значительными запасами.

Это особенно актуально для России, где утвержденная в 2020 г. программа развития угольной промышленности до 2035 г. предусматривает значительное наращивание добычи. Согласно данной программе, к 2030 г. объемы добычи могут достичь 476 млн т при консервативном сценарии и 659 млн т при оптимистичном.

При этом ключевыми приоритетами энергетической стратегии России до 2035 г. определены обеспечение энергетической безопасности, повышение энергетической и экономической эффективности, а также устойчивое развитие энергетического сектора.

Добыча угля традиционно связана с высоким риском аварий, приводящих к травматизму и серьезному экономическому ущербу. При наблюдающемся росте угледобычи и интенсификации горных работ важно уделять особое внимание вопросам безопасности и искать способы снижения аварийности для сохранения жизни и здоровья людей и минимизации материального ущерба. Анализ аварийности и применяемых мер по обеспечению безопасности на угледобываю-

щих предприятиях стран — лидеров по добыче угля может послужить важным источником информации, необходимым для дальнейшего повышения безопасности на угольных шахтах в различных странах, в том числе и в России.

Анализ травматизма в угольной промышленности ведущих угледобывающих стран

За период с 2013 по 2023 гг. в Китае, Индии, России и США в результате горных работ по добыче угля погибло в общей сложности 3843 человека, что делает угледобывающую отрасль одной из самых опасных [3]. Однако, как видно из рис. 3, в данный период наблюдается общемировая тенденция к снижению количества смертельных случаев в угледобывающей отрасли. Наибольшую динамику снижения смертельного травматизма демонстрирует Китай, где количество смертельно травмированных сократилось с 467 чел. в 2013 г. до 176 чел. в 2023 г. (снижение на 62,3%) [1]. При этом среднегодовой показатель в КНР (259,7 чел.) значительно превосходит аналогичные значения других стран, что может объясняться масштабами добычи. Стоит отметить, что для Китая также характерны периодические всплески количества смертельно травмированных, такие как в 2016 г. (289 чел.) и 2019 г. (299 чел.) [1].

Угледобывающая отрасль США характеризуется наиболее стабильными показателями со средним значением 11,9 смертельно травмированных в год и планомерным снижением с 20 до 9 чел. за рассматриваемый период, что хорошо коррелирует со снижением добычи угля за этот период с 893,4 до 526,5 млн т (коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,8).

Российская статистика отличается существенными колебаниями смертельного травматизма: от минимума в 7 чел.

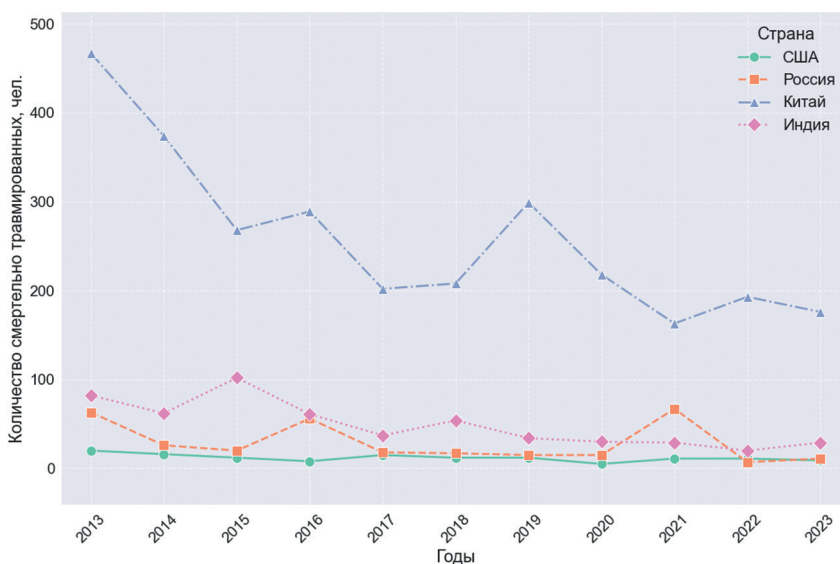


Рис. 3. Динамика количества смертельно травмированных при добыче угля по странам в 2013–2023 гг.
 Fig. 3. Dynamics of the number of fatally injured in coal mining by country in 2013–2023

(2022 г.) до максимумов в 63 и 67 чел. (2013 и 2021 гг. соответственно). В Индии прослеживается устойчивое улучшение ситуации: количество смертельно травмированных сократилось с 82 до 29 (снижение на 64,6%).

Для того, чтобы получить более объективную картину, нивелировав различия в масштабах производства между странами, используется удельный показатель смертельного травматизма, который определяется как количество смер-

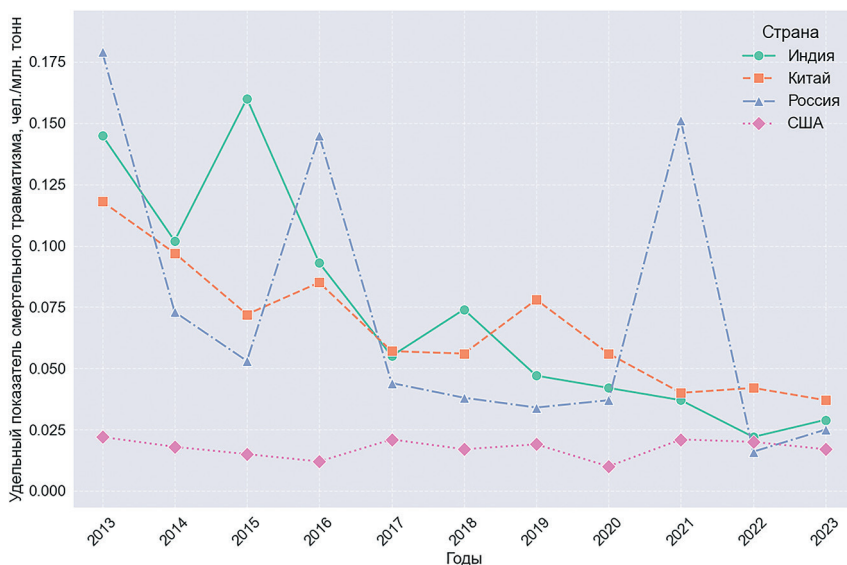


Рис. 4. Динамика удельного показателя смертельного травматизма при добыче угля по странам в 2013–2023 гг.
 Fig. 4. Dynamics of fatality rate per million tons in coal mining by country in 2013–2023

тельно травмированных работников на 1 млн т добытого угля (рис. 4). США демонстрирует наиболее низкие и стабильные значения удельного показателя смертельного травматизма (среднее значение 0,017 чел./млн т, что в 3–5 раз ниже, чем у других рассматриваемых стран).

Индия, имевшая высокие значения показателя в начале периода (0,145 чел./млн т в 2013 г.), достигла значительного прогресса, уменьшив удельный показатель смертельного травматизма до 0,029 в 2023 г. (снижение на 80%). Однако в 2015 г. наблюдался существенный всплеск до 0,16 чел./млн т.

Наблюдаемые значения удельного показателя смертельного травматизма в России характеризуются наиболее выраженной изменчивостью. Несмотря на общий тренд к снижению с 0,179 до 0,025 чел./млн т (снижение на 86% за рассматриваемый период), наблюдаются резкие всплески в 2016 г. (0,145 чел./млн т) и 2021 г. (0,151 чел./млн т), что в 4–5 раз превышает среднегодовые значения последних лет. Данные пики показателей травматизма связаны с катастрофическими авариями на шахтах «Северная» и «Листвяжная».

В Китае, несмотря на лидерство по абсолютному количеству смертельных случаев, наблюдается устойчивое снижение удельного показателя смертельного травматизма с 0,118 в 2013 г. до 0,037 в 2023 г. (на 68,6%), с менее выраженными колебаниями по сравнению с Россией и Индией. Это свидетельствует о том, что столь высокие абсолютные показатели травматизма в значительной степени обусловлены масштабами добычи. Однако среднее значение удельного показателя смертельного травматизма за период с 2018 по 2023 гг. все равно остается более высоким по сравнению с другими странами (Китай — 0,051, Россия — 0,050, Индия — 0,043, США — 0,017).

Угледобыча в Китае существенно отличается от других стран тем, что из-за глубоко залегающих запасов угля 87% его добычи приходится на угольные шахты [1]. В других странах основная часть угля добывается в ходе открытых горных работ, например, в Индии 96,2% угля добывается открытым способом (без учета смешанной добычи), в Австралии — 76,7%, в России — 75,2%, а в США — 63,9%. Открытая добыча экономически более эффективна, так как позволяет извлекать большие объемы угля при сравнительно низких затратах, такой метод добычи дает доступ к более крупным пластам угля, которые залегают близко к поверхности, что упрощает его извлечение и транспортировку.

Однако не все залежи угля доступны для разработки открытым способом, что приводит к необходимости использования подземного способа добычи. Такой способ добычи является более дорогостоящим и связан с более высокими рисками для жизни и здоровья работников. Между долей добычи и долей травматизма при подземной угледобыче наблюдается значительная диспропорция: в России при доле подземной добычи 24,8% на нее приходится 87,5% случаев смертельного травматизма. Похожая ситуация наблюдается и в США, где 65,4% случаев смертельного травматизма происходит при проведении подземных горных работ по добыче угля, на которые приходится 35,7% от общего объема его добычи. Даже в Индии, где в угольных шахтах добывается всего 1,8% угля, на подземный способ приходится 40,6% от общего числа смертельно травмированных.

Для более точной оценки распределения смертельного травматизма в зависимости от вида работ и проведения сравнительного анализа между странами были рассчитаны средние значения удельного показателя смертельного трав-

Таблица 2

Сравнительные показатели травматизма при подземном и открытом способах добычи угля за 2013–2023 гг.

Comparative indicators of injuries in underground and open-pit coal mining for 2013–2023

Показатель	Россия	США	Индия
Общее количество смертельно травмированных при подземных и открытых горных работах, чел.	305	127	505
Количество смертельно травмированных при подземных горных работах, чел.	267	83	205
Количество смертельно травмированных при открытых горных работах, чел.	38	44	300
Суммарная добыча за период, млн т	4493,1	7377,3	8004,8
Доля подземной добычи, %	24,8	35,7	1,8
Удельный смертельный травматизм (общее значение), чел./млн т	0,068	0,017	0,063
Удельный смертельный травматизм (подземные работы), чел./млн т	0,240	0,032	1,423
Удельный смертельный травматизм (открытые работы), чел./млн т	0,011	0,009	0,039
Коэффициент опасности подземных работ	21,82	3,56	36,49

матизма за период с 2013 по 2023 гг., а для оценки опасности подземных горных работ по сравнению с открытыми горными работами — введен коэффициент опасности подземных работ, определяемый как отношение удельного травматизма при подземных работах к удельному травматизму при открытых работах (табл. 2).

Полученные значения показателей, представленные в табл. 2, говорят об огромных различиях в уровне производственного травматизма между подземным и открытым способами добычи угля. В Индии, несмотря на очень низкую долю подземной добычи угля в общем объеме (1,8%), фиксируется максимальный удельный показатель смертельного травматизма для подземных горных работ — 1,423 чел./млн т, что в 36,49 раз больше аналогичного показателя для открытых горных работ (0,039 чел./млн т).

Также большой разрыв между смертельным травматизмом при подземной и открытой добыче угля характерен для России, где наблюдается очень высокий коэффициент опасности подземных ра-

бот — 21,82, в шесть раз превышающий данный показатель для США (3,56).

Значения удельных показателей смертельного травматизма также показывают существенные различия между странами. При подземной добыче наименьший показатель наблюдается у США (0,032 чел./млн т), что в 7,5 раз ниже, чем в России (0,240 чел./млн т), и в 44,5 раз ниже, чем в Индии (1,423 чел./млн т).

При открытых горных работах наблюдается меньший разброс показателей между странами. США также демонстрирует наилучший результат (0,009 чел./млн т), однако разрыв с другими странами уже не так велик — показатель России (0,011 чел./млн т) превышает американский в 1,2 раза, что свидетельствует о сопоставимом уровне безопасности при открытой добыче, а индийский (0,039 чел./млн т) — в 4,3 раза.

Коэффициент опасности подземных работ может служить показателем, характеризующим относительную опасность подземной добычи по сравнению с открытой в конкретных горно-геологических и технологических условиях

каждой страны. Существенные различия в значениях данного коэффициента указывают на возможный потенциал снижения травматизма при подземной добыче в России и Индии за счет внедрения новых подходов к предупреждению аварий на угольных шахтах и минимизации их последствий.

Анализ аварийности и причин травматизма

Угольная промышленность в разных странах сталкивается с различными проблемами безопасности, которые являются результатом сложного взаимодействия геологических, технологических и организационных факторов [3]. Это отражается в том числе и в различающейся структуре причин травматизма и аварийности между странами, однако можно выделить и ряд общих проблем.

Анализ причин смертельного травматизма в Индии и США за период с 2013 по 2023 гг. показывает схожие тенденции в структуре причин смертельного травматизма, несмотря на существенные различия в динамике и технологических особенностях добычи угля. В США основными причинами смертельного травматизма являются происшеств-

вия, связанные с транспортом (45,2%), обрушением пород (20,6%), и несчастные случаи при работе с технологическим оборудованием (18,3%) (рис. 5).

В Индии также преобладают транспортные происшествия (34,3% смертельно травмированных) и случаи, связанные с обрушением пород и оползнями при открытых горных работах (24,3%). Существенную долю также составляют инциденты с технологическим оборудованием (15,6%) и падения (10,1%) (рис. 6).

Важно отметить, что доля пожаров и взрывов газа, угольной пыли в обеих странах относительно невелика и составляет 2,4% в США и 2,2% в Индии, что может быть обусловлено преобладанием открытого способа добычи — 96,2% в Индии и 63,9% в США, а также различиями в горно-геологических условиях по сравнению с Россией и Китаем.

Принципиально иная ситуация наблюдается в Китае, крупнейшем в мире производителе угля, где более 80% его добычи осуществляется подземным способом. В Китае наибольшую опасность представляют взрывы газа, на которые приходится 35,7% всего смертельного травматизма. Второе место занимают обрушения пород (17,7%), далее следу-

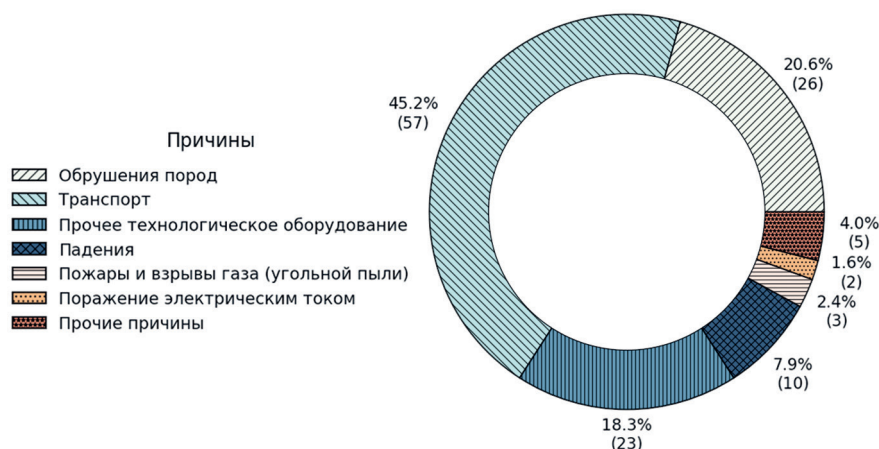


Рис. 5. Причины смертельного травматизма при добыче угля в США в 2013–2023 гг.

Fig. 5. Causes of fatal injuries in coal mining in USA in 2013–2023

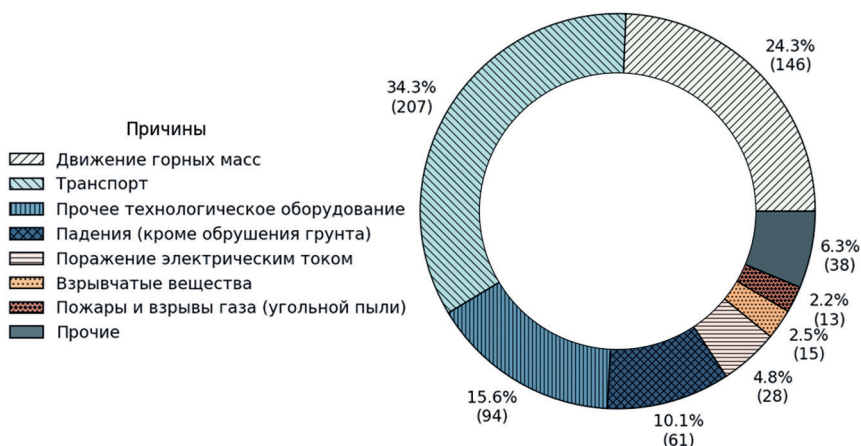


Рис. 6. Причины смертельного травматизма при добыче угля в Индии в 2013–2023 гг.
 Fig. 6. Causes of fatal injuries in coal mining in India in 2013–2023

ют затопления (11,6%) и пожары (7,3%). При этом анализ аварийности за тот же период показывает несколько иное распределение: обрушения пород составляют 24,3% от общего числа аварий, взрывы газа — 17,2%, а транспортные происшествия и затопления 14% и 8,6% соответственно (рис. 7).

Взрывы газа являются наиболее тяжелым видом аварий при добыче угля в Китае — среднее количество смертельно травмированных на один взрыв со-

ставляет 7 чел. Несмотря на также сравнительно небольшую долю в структуре аварийности, пожары являются вторым по тяжести видом аварий, со средним числом смертельно травмированных 5,8 чел./случай, что говорит о необходимости приоритетного внимания к предотвращению взрывов газа и пожаров.

В России, как и в Китае, обрушение пород является самым распространенным видом аварий, составляя 33,8% от общего их числа. Несмотря на меньшую

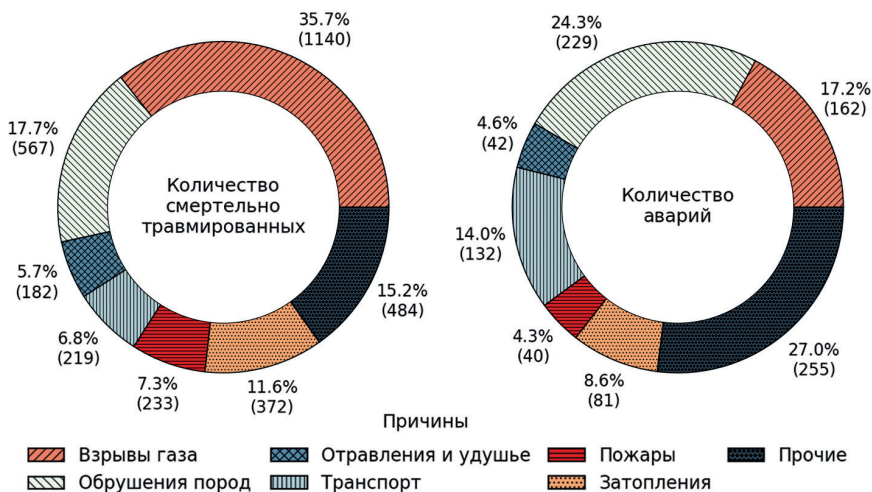


Рис. 7. Структура смертельного травматизма и аварийности при добыче угля в Китае в 2012–2023 гг.
 Fig. 7. Structure of fatal injuries and accidents in coal mining in China in 2012–2023

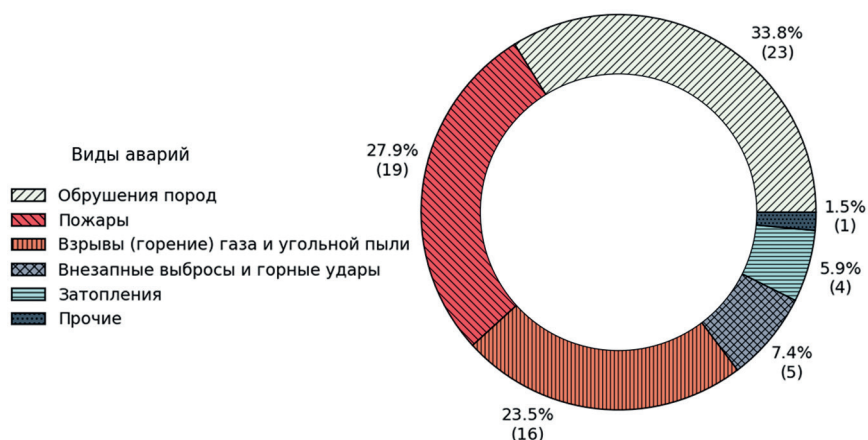


Рис. 8. Виды аварий, произошедших при добыче угля в России в 2013–2023 гг.
 Fig. 8. Types of accidents in Russian coal mining operations in 2013–2023

долю подземной добычи (24,8% от всего добываемого угля), в России наблюдается самая высокая концентрация происшествий, связанных с взрывами газа, угольной пыли и пожарами — на пожары приходится 27,9% всех аварий за рассматриваемый период, а на взрывы (горение, вспышки) газа и угольной пыли — 23,5%. Далее следуют внезапные выбросы угля, породы и газа и горные удары, которые происходят значительно реже, составляя 7,4% от всех аварий, а также затопления с долей 5,9% (рис. 8).

При сходной структуре основных видов аварий в России и Китае, относительная доля взрывов газа, угольной пыли и пожаров в России существенно выше (51,4% против 21,5% в Китае).

Возможно выделить две группы стран с принципиально различными моделями распределения рисков.

В первой группе (США и Индия) преобладают травмы, связанные с механизацией работ и человеческим фактором — транспортные происшествия, падения и аварии, связанные с эксплуатацией технологического оборудования.

Во второй группе (Россия и Китай) ключевую роль играют взрывы газа и угольной пыли, пожары и основные ри-

ски связаны в большей степени с природными факторами.

Такое различие может быть обусловлено несколькими факторами.

Во-первых, способом добычи полезных ископаемых — в США и особенно в Индии значительная часть добычи ведется открытым способом, что существенно снижает риски, связанные с взрывами газа и пожарами.

Во-вторых, горно-геологическими условиями — месторождения в России и Китае характеризуются большей глубиной залегания, более высокой газоносностью пластов и склонностью углей к самовозгоранию [4, 5]. Обрушение пород является единственным видом аварий, сохраняющим значительную долю в структуре травматизма и аварийности вне зависимости от страны. В России и Китае обрушение пород является самым распространенным видом аварий, что также может быть обусловлено необходимостью ведения работ на больших глубинах при повышенных нагрузках на крепь и в сложных горно-геологических условиях [6].

В России пожары, взрывы газа и угольной пыли составляют более половины всех аварий на угледобывающих пред-

приятных, что указывает на необходимость внедрения дополнительных мер безопасности, направленных на предупреждение данных аварий и минимизацию их последствий. При этом эндогенные пожары в России преобладают над экзогенными: за период с 2013 по 2023 гг. доля эндогенных пожаров составила 63,2%, а экзогенных — 36,8%. Это объясняется тем, что более 60% разрабатываемых в России шахтопластов являются склонными к самовозгоранию [7].

Пути снижения пожаровзрывоопасности на угольных шахтах

В снижении рисков, связанных с пожарами, значительную роль играют превентивные меры, направленные на раннее обнаружение и прогнозирование пожаров, а также поддержание оптимальных параметров вентиляции. Для раннего обнаружения очагов самовозгорания угля наиболее широко применяется оценка газового состава рудничной атмосферы, основанная на измерении концентраций индикаторных газов (CO , CO_2 , H_2 , C_2H_4), образующихся на разных стадиях экзотермического процесса окисления угля, а также расчете их соотношений для повышения надежности данных по обнаружению самовозгораний угля, например CO/CO_2 [8, 9].

Также в качестве индикатора ранних стадий процесса самовозгорания может использоваться радон, скорость выделения которого сильно коррелирует с температурой угля, что делает радоновый контроль более надежным методом в условиях действия факторов, оказывающих влияние на концентрации таких газов, как CO , CO_2 , H_2 , например, при разбавлении индикаторных газов под действием вентиляционного потока до концентраций, находящихся ниже пределов обнаружения, или при наличии других источников газов [10].

Для достижения более высокой точности и надежности системы раннего обнаружения самовозгорания угля наиболее перспективным подходом является комплексное использование различных методов, среди которых может, в том числе, использоваться тепловизионная съемка, которая широко применяется в зарубежных странах для выявления температурных аномалий как на поверхности, так и в подземных условиях, а также электромагнитные и акустические методы [11].

В целях прогнозирования развития пожаров в угольных шахтах и разработки эффективных мер по их предотвращению, локализации и ликвидации все более широкое применение находит численное моделирование, в частности методы вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics). CFD-модели позволяют получить детальную информацию о параметрах воздушного потока, давлении, концентрации газов и тепловых потоках в моделируемой области. Эти данные могут быть использованы для оптимизации параметров вентиляции, оценки различных методов пожаротушения и определения оптимальных маршрутов эвакуации [12].

Особого внимания заслуживает наличие взаимосвязи между пожарами и взрывами в подземных выработках и значительная вероятность перехода одного вида аварии в другой. Например, пожар может стать источником воспламенения метановоздушной смеси и привести к взрыву газа. Взрыв газа, в свою очередь, часто инициирует взрыв угольной пыли, поскольку ударная волна поднимает осевшую пыль, создавая взрывоопасную концентрацию в воздухе. Эта цепочка событий приводит к значительному увеличению масштабов аварии и особенно характерна для России и Китая [13, 14].

Стоит отметить, что в системе профилактических мероприятий по сниже-

нию взрывопожароопасности угольных пластов основной акцент сделан на метан, однако наряду с метаном в состав газов угленосных отложений входят также тяжелые углеводороды, включающие как предельные (гомологи метана), так и непредельные углеводороды [15]. Эти газы представляют повышенную опасность, поскольку имеют более низкую температуру воспламенения и меньшие значения нижнего концентрационного предела взрываемости по сравнению с метаном в сочетании с более высокой теплотворной способностью [16]. Таким образом, воспламенение тяжелых углеводородов, выделяющихся в процессе механического разрушения газоносного угольного пласта, может дать тепловой импульс для взрыва метана, поднимающего в воздух и нагревающего угольную пыль, вследствие чего происходит выделение из нее тяжелых углеводородов и последующее их воспламенение, что еще больше увеличивает суммарную энергию взрыва.

Для снижения рисков взрыва угольной пыли в большинстве стран применяется обработка горных выработок негорючей инертной пылью, которая разбавляет угольную пыль и за счет более высокой теплоемкости и теплопроводности забирает большую часть тепловой энергии на себя, ограничивая ее передачу к взрывоопасным частицам угля [17, 18].

Увлажнение угольных пластов и орошение также являются эффективными способами снижения взрывопожароопасности при проведении горных работ. Вода, смачивая частицы пыли, увеличивает их массу, что препятствует их взмыванию в воздух и увеличивает скорость осаждения находящихся в воздухе частиц. Кроме того, испаряющаяся влага снижает температуру в выработке, что также уменьшает риск возникновения пожаров и взрывов. Для повышения

эффективности пылеподавления в воду добавляются поверхностно-активные вещества, которые улучшают ее смачивающие свойства за счет снижения поверхностного натяжения, при этом необходимы дополнительные исследования по поиску оптимальных концентраций смачивателя и температуры раствора в зависимости от типа угля и дисперсного состава пыли [19, 20].

Заключение

Сложившаяся ситуация по добыче угля в России требует повышения эффективности мер безопасности, направленных на предупреждение пожаров и взрывов, а также минимизацию их последствий. Важное значение при этом имеет раннее обнаружение потенциальных очагов самовозгорания с использованием комбинированных методов контроля, а также внедрение современных методов моделирования, позволяющих прогнозировать развитие пожаров, оптимизировать параметры вентиляции и оценивать эффективность мер по предотвращению, локализации и ликвидации аварий на угольных шахтах. Особое внимание также следует уделять взаимосвязи между различными видами аварий, учитывая высокую вероятность перехода пожаров во взрывы и наоборот. При этом важно расширить существующую систему предупредительных мероприятий, учитывая влияние тяжелых углеводородов и угольной пыли на развитие аварийных ситуаций.

Выводы:

1. Несмотря на продолжающийся рост мирового потребления и добычи угля, достигшей в 2023 г. рекордных 8970 млн т, среди ведущих угледобывающих стран мира, таких как Китай (52,51% от мирового объема добычи), Индия (11,27%), США (5,86%) и Россия (4,89%), наблюдается общий тренд снижения уровня смертельного травматиз-

ма. За период с 2013 по 2023 гг. удельный показатель смертельного травматизма в Китае снизился на 68,6%, до 0,037 чел./млн т, в Индии — на 80%, до 0,029 чел./млн т, а в России — на 86%, до 0,025 чел./млн т. Однако, несмотря на общее снижение показателя, Россия наиболее подвержена выраженным всплескам травматизма, обусловленным периодически происходящими крупными авариями.

2. Значения коэффициента опасности подземных работ для России составляет 21,82, для Индии — 36,49. В США данный коэффициент в шесть раз ниже (3,56), что указывает на возможный потенциал снижения травматизма при подземной добыче в России и Индии.

3. В США и Индии причинами большей части смертельного травматизма являются происшествия, связанные с механизацией работ и человеческим фактором: транспортные происшествия, аварии при работе с оборудованием и падения, что в значительной степени

обусловлено преобладанием открытого способа добычи угля. В России и Китае, характеризующихся более сложными горно-геологическими условиями, ключевые риски связаны с природными факторами: взрывами газа и угольной пыли, пожарами и обрушениями пород.

4. Взрывы газа в Китае приводят к наибольшему числу жертв (35,7% от общего числа смертельно травмированных) — в среднем 7 чел. на один случай, а пожары, хоть и являются менее распространенными (4,3% аварий), относятся ко второму по тяжести последствий виду аварий (в среднем 5,8 погибших на случай).

5. В России, несмотря на сходную с Китаем структуру основных видов аварий, наблюдается самая высокая доля происшествий, связанных со взрывами газа, угольной пыли и пожарами (51,4% всех аварий) — из них 27,9% составляют пожары и 23,5% взрывы (горение) газа и угольной пыли. При этом 63,2% от общего числа пожаров относятся к эндогенным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X., Li L., Yang Y. Development status of coal mining in China // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2023, vol. 123, no. 1, pp. 19–28. DOI: 10.17159/2411-9717/1506/2023.

2. Plakitina L. S. Coal industry global transformations: Analysis and projections // Energy Systems Research. 2024, vol. 7, no. 1, pp. 37–43. DOI: 10.25729/esr.2024.01.0004.

3. Кабанов Е. И. Анализ риска аварий на угольных шахтах с учетом человеческого фактора // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 48–54. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.

4. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэрологические риски аварий в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.

5. Kong B., Cao Z., Sun T., Qi C., Zhang Y. Safety hazards in coal mines of Guizhou China during 2011–2020 // Safety Science. 2022, vol. 145, article 105493. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105493.

6. Wang Y.-J., Zhao L.-S., Xu Y.-S. Analysis of characteristics of roof fall collapse of coal mine in Qinghai Province, China // Applied Sciences. 2022, vol. 12, no. 3, article 1184. DOI: 10.3390/app12031184.

7. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

8. Ma T., Zhai X.-W., Xiao Y., Bai Y.-E., Shen K., Song B.-B., Hao L., Ren L.-F., Chen X.-K. Study on the influence of key active groups on gas products in spontaneous combustion of coal // Fuel. 2023, vol. 344, article 128020. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128020.

9. Rodionov V., Skripnik I., Kaverzneva T., Zhikharev S., Kriklivyy S., Panov S. Prerequisites for applying the risk-based approach to assessing the explosive and fire hazardous properties of under-

ground mining materials // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 417, article 05013. DOI: 10.1051/e3sconf/202341705013.

10. Wen H., Cheng X., Fan S., Xu Y., Ren S., Guo J. A method for detecting hidden fire source in deep mine goafs based on radon measurement and its experimental verification // Applied Geochemistry. 2020, vol. 117, article 104603. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104603.

11. Kong B., Zhong J., Wei J., Lu W., Sun X., Yang G., Zhao X., Ma L. Study on sound wave kinematic characteristics and temperature sensing mechanism during the warming process of loose coals // Energy. 2024, vol. 307, article 132753. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132753.

12. Федоткин И. О., Федоткин Д. В. Проблемы пожаров в угольных шахтах и обзор современных подходов к их моделированию // Уголь. — 2024. — № 2. — С. 69–73. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

13. Bosikov I. I., Martynushev N. V., Klyuev R. V., Savchenko I. A., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits // Fire. 2023, vol. 6, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fire6030095.

14. Zhu Y., Wang D., Shao Z., Xu C., Zhu X., Qi X., Liu F. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China // Process Safety and Environmental Protection. 2019, vol. 121, pp. 357–366. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.

15. Ганова С. Д., Скопинцева О. В., Исаев О. Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330. — № 6. — С. 109–115. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2132.

16. Родионов В. А., Серегин А. С., Иконников Д. А. Мультипликативный метод оценки взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы при поступлении в воздушную среду углеводородных газов // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 35–40. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05.

17. Романченко С. Б., Нагановский Ю. К., Корнев А. В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

18. Li F., He X., Zhang Yu., Wang Ch., Tang J., Sun R. Superposition risk assessment of the working position of gas explosions in Chinese coal mines // Process Safety and Environmental Protection. 2022, vol. 167, pp. 274–283. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.017.

19. Пернебек Б. П., Семенов Ю. В., Рыбичев А. А., Козлова Л. О. Оценка эффективности смазываемости угольной пыли при разных температурах растворов // Уголь. — 2024. — № 1. — С. 70–75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75.

20. Пернебек Б. П., Федоткин И. О., Рассолова М. А., Андреев А. А., Степанов Е. А., Чикалин Н. М., Нежелская Д. А. Исследование процесса седиментации частиц бурого угля // Уголь. — 2024. — № 9. — С. 70–75. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-70-75. **PLoS**

REFERENCES

1. Liu X., Li L., Yang Y. Development status of coal mining in China. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023, vol. 123, no. 1, pp. 19–28. DOI: 10.17159/2411-9717/1506/2023.

2. Plakitkina L. S. Coal industry global transformations: Analysis and projections. *Energy Systems Research*. 2024, vol. 7, no. 1, pp. 37–43. DOI: 10.25729/esr.2024.01.0004.

3. Kabanov E. I. Analysis of accidents risk in coal mines taking into account human factor. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 48–54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.

4. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Assessment of heavy hydrocarbons influence on aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 234–245. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.

5. Kong B., Cao Z., Sun T., Qi C., Zhang Y. Safety hazards in coal mines of Guizhou China during 2011 – 2020. *Safety Science*. 2022, vol. 145, article 105493. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105493.

6. Wang Y.-J., Zhao L.-S., Xu Y.-S. Analysis of characteristics of roof fall collapse of coal mine in Qinghai Province, China. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 3, article 1184. DOI: 10.3390/app12031184.

7. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276–285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

8. Ma T., Zhai X.-W., Xiao Y., Bai Y.-E., Shen K., Song B.-B., Hao L., Ren L.-F., Chen X.-K. Study on the influence of key active groups on gas products in spontaneous combustion of coal. *Fuel*. 2023, vol. 344, article 128020. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128020.

9. Rodionov V., Skripnik I., Kaverzneva T., Zhikharev S., Kriklivy S., Panov S. Prerequisites for applying the risk-based approach to assessing the explosive and fire hazardous properties of underground mining materials. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 417, article 05013. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341705013.

10. Wen H., Cheng X., Fan S., Xu Y., Ren S., Guo J. A method for detecting hidden fire source in deep mine goafs based on radon measurement and its experimental verification. *Applied Geochemistry*. 2020, vol. 117, article 104603. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104603.

11. Kong B., Zhong J., Wei J., Lu W., Sun X., Yang G., Zhao X., Ma L. Study on sound wave kinematic characteristics and temperature sensing mechanism during the warming process of loose coals. *Energy*. 2024, vol. 307, article 132753. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132753.

12. Fedotkin I. O., Fedotkin D. V. The problems of fires in coal mines and a review of modern approaches to their modelling. *Ugol'*. 2024, no. 2, pp. 69–73. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-69-73.

13. Bosikov I. I., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Savchenko I. A., Kukartsev V. V., Kukartsev V. A., Tynchenko Y. A. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023, vol. 6, no. 3, article 95. DOI: 10.3390/fire6030095.

14. Zhu Y., Wang D., Shao Z., Xu C., Zhu X., Qi X., Liu F. A statistical analysis of coalmine fires and explosions in China. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 121, pp. 357–366. DOI: 10.1016/j.psep.2018.11.013.

15. Ganova S. D., Skopintseva O. V., Isaev O. N. On the issue of studying the composition of hydrocarbon gases of coals and dust to predict their potential hazard. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019, vol. 330, no. 6, pp. 109–115. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2019/6/2132.

16. Rodionov V. A., Seregin A. S., Ikonnikov D. A. Multiplicative method to assess fire and explosion hazard of mine air containing hydrocarbon gases. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 35–40. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05.

17. Romanchenko S. B., Naganovskiy Y. K., Kornev A. V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 927–936. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

18. Li F., He X., Zhang Yu., Wang Ch., Tang J., Sun R. Superposition risk assessment of the working position of gas explosions in Chinese coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022, vol. 167, pp. 274–283. DOI: 10.1016/j.psep.2022.09.017.

19. Pernebek B. P., Semenov Yu. V., Rybichev A. A., Kozlova L. O. Assessment of the effectiveness of wettability of coal dust at different solution temperatures. *Ugol'*. 2024, no. 1, pp. 70–75. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-70-75.

20. Pernebek B. P., Fedotkin I. O., Rassolova M. A., Andreev A. A., Stepanov E. A., Chikalina N. M., Nezhelskaya D. A. Investigation of lignite particle sedimentation process. *Ugol'*. 2024, no. 9, pp. 70–75. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-70-75.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Федоткин Илья Олегович – аспирант,
Университет науки и технологий МИСИС,
e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com, ORCID ID:0009-0004-2399-480X.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

I.O. Fedotkin, Graduate Student,
University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia,
e-mail: fedotkin.iliya@gmail.com, ORCID ID:0009-0004-2399-480X.

Получена редакцией 13.11.2024; получена после рецензии 16.12.2024; принята к печати 10.02.2025.
Received by the editors 13.11.2024; received after the review 16.12.2024; accepted for printing 10.02.2025.