

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПЛАСТОВ СРЕДНЕЙ СТАДИИ МЕТАМОРФИЗМА

О.В. Скопинцева<sup>1</sup>, С.В. Баловцев<sup>1</sup>, А.А. Рыбичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

**Аннотация:** Проведенный анализ состояния пылевзрывобезопасности угольных шахт и обработка статистических данных по авариям, когда обычная вспышка метана в забое наносила огромный ущерб и являлась причиной гибели десятков людей, находящихся на значительном расстоянии от забоя, показали несовершенство существующей концепции обеспечения взрывобезопасности горных работ на высокогазоносных угольных пластах, опасных по взрывам угольной пыли. Установлено, что количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли, на 23% больше, чем количество углеводородов, извлеченных из угля. Угольная пыль адсорбирует преимущественно бутан, пентан, гексан. Плотность этих газов составляет от 2 до 3,5 раз больше плотности воздуха, поэтому они оседают на почву выработки. При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов. Таким образом, от источника теплового импульса могут сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана. При взрыве метана находящаяся в выработке угольная пыль поднимается в воздух, нагревается, и из нее выделяются сорбированные ею тяжелые углеводороды, которые придают значительное усиление мощности взрыва метана и угольной пыли. Полученные данные позволяют разработать мероприятия по повышению взрывопожаробезопасности угольных шахт.

**Ключевые слова:** взрывопожаробезопасность угольных шахт, угольная пыль, дисперсный состав пыли, метан, тяжелые углеводороды, концентрационные пределы взрываемости, температура воспламенения.

**Для цитирования:** Скопинцева О. В., Баловцев С. В., Рыбичев А. А. Исследование взрывопожароопасности угольной пыли пластов средней стадии метаморфизма // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 80–94. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_5\_0\_80.

### Investigation of the explosion and fire hazard of coal dust in formations of the middle stage of metamorphism

O.V. Skopintseva<sup>1</sup>, S.V. Balovtsev<sup>1</sup>, A.A. Rybichev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: rybichev@yandex.ru

**Abstract:** An analysis of the state of dust and explosion safety in coal mines and the processing of statistical data on accidents when a common methane flare in the face caused enormous damage and resulted in the deaths of dozens of people located at a considerable distance from the face revealed the imperfection of the existing concept of ensuring explosion safety in mining

operations in highly gaseous coal seams, dangerous for coal dust explosions. It was established that the amount of hydrocarbons extracted from coal dust is 23% more than the amount of hydrocarbons extracted from coal. Coal dust adsorbs mainly butane, pentane, and hexane. The density of these gases is ranges from 2 to 3.5 times the density of air, so they settle on the soil of the mine. Ignition temperatures of heavy hydrocarbons may occur during the operation of combine harvesters, mine belt conveyors and other equipment in the excavation area. Thus, heavy hydrocarbons can first flare up from the source of the thermal pulse, which will give a spark for the explosion of methane. During a methane explosion, coal dust in the workings rises into the air, heats up, and heavy hydrocarbons, which are absorbed by it, are released from it, which significantly enhance the explosion power of methane and coal dust. The data obtained make it possible to develop measures to improve the explosion and fire safety of coal mines.

**Key words:** explosion and fire safety of coal mines, coal dust, dust dispersion, methane, heavy hydrocarbons, explosive concentration limits, ignition temperature.

**For citation:** Skopintseva O. V., Balovtsev S. V., Rybichev A. A. Investigation of the explosion and fire hazard of coal dust in formations of the middle stage of metamorphism. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(5):80-94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_5\_0\_80.

---

## Введение

В системе профилактических мероприятий, способов и средств борьбы со взрывами в угольных шахтах основное внимание уделено метану [1–3], однако известно, что при разработке пластов средней стадии метаморфизма в шахтную атмосферу выделяются гомологи метана [4, 5], имеющие меньшие концентрационные пределы взрываемости по сравнению с метаном. Угольная пыль, находящаяся в шахте в большом количестве, хорошо сорбирует тяжелые углеводороды, особенно бутан, пентан и гексан, так как эти газы тяжелее воздуха от 2,5 до 3 раз и вследствие стратификации воздушного потока опускаются на почву выработок, покрытую отложившейся пылью [6–8]. И если метан вентиляцией удаляется из шахты, с последующей возможностью его использования как сопутствующего ресурса [9–11], то сорбированная тяжелыми углеводородными пылью хотя и осланцовывается, но остается в шахте.

Таким образом, пыль угольных пластов средней стадии метаморфизма вследствие хорошей сорбционной спо-

собности формирует «свою» шахтную атмосферу, взрывоопасные примеси в которой дополняются сорбированными в пыли тяжелыми углеводородами [12], оказывающими синергетический эффект при взрывах метана и угольной пыли.

В решении проблемы борьбы со взрывами метана и угольной пыли практически не исследовался состав остаточных газов пластов угля разных марок и сорбированных пылью углеводородов, влияющих на ее взрывопожароопасные свойства, особенно для пыли угольных пластов средней стадии метаморфизма.

Целью исследований явилось установление зависимостей содержания тяжелых углеводородов в угольных пластах от степени метаморфизма и оценка роли тяжелых углеводородов в создании пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

## Теоретические и экспериментальные исследования

Проведены исследования дисперсного состава угольной пыли, отложившейся на выемочном участке № 1 лавы

4-1-5-9 шахты «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южкузбассуголь», при обработке пласта Е-5 (марка Ж), а также в магистральном конвейерном штреке. Места и объемы отбора проб отложившейся пыли были следующими:

- пыль после комбайна в лаве, 200 г;
- пыль с пересыпа конвейера лавы по ходу движения вентиляционной струи, 200 г;
- пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы по ходу движения вентиляционной струи, 200 г;
- пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы по ходу движения вентиляционной струи, 200 г.

Определение гранулометрического состава отложившейся пыли проводили лазерным методом на дифракционном микроанализаторе размера частиц ANALYZETTE 22 MicroTec plus (FRITSCH). Дифференциальная ( $f(d)$ ) и интегральная ( $F(d)$ ) кривые распреде-

ления частиц пыли представлены на рис. 1–4 (каждый рисунок соответствует одной из четырех проб, места отбора которых указаны в подрисуночных подписях).

По данным литературных источников установлено, что в случае одиночного источника пылеобразования пыль мономодальна, ее функция плотности распределения имеет один максимум [13–15]. Очевидно, что в лавках имеет место витание и отложение частиц пыли от нескольких источников пылеобразования: очистного комбайна, лавных конвейеров, перегружателей, секций крепи при их подвигании и т.д. В этом случае вентиляционным потоком создается суммарный аэрозоль с дифференциальной функцией распределения частиц пыли, имеющей несколько локальных максимумов. В нашем случае (см. рис. 1–4) наблюдается по два локальных максимума.

По интегральным и дифференциальным кривым распределения частиц пыли были определены объемные доли

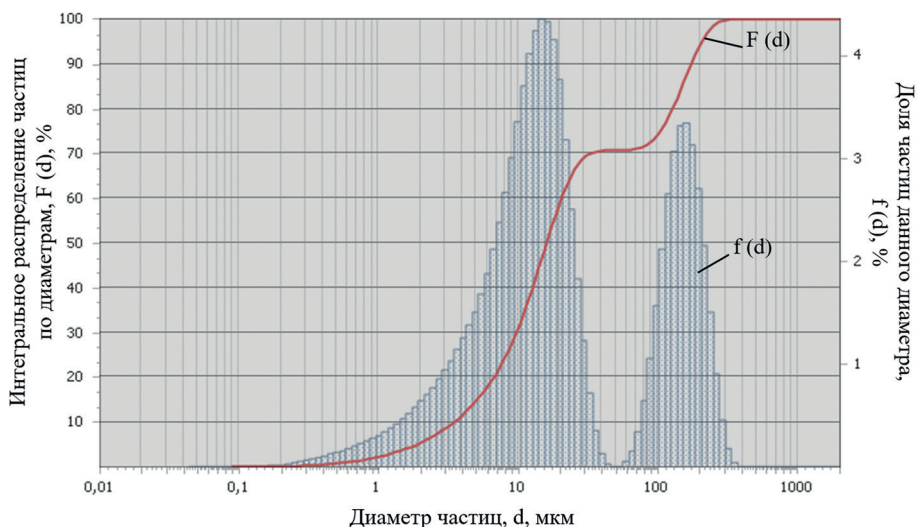


Рис. 1. Дифференциальная ( $f(d)$ ) и интегральная ( $F(d)$ ) кривые распределения частиц пыли (пласт Е-5, пыль после комбайна в лаве)

Fig. 1. Differential ( $f(d)$ ) and integral ( $F(d)$ ) curves of dust particle distribution (seam E-5, dust after the combine in the lava)

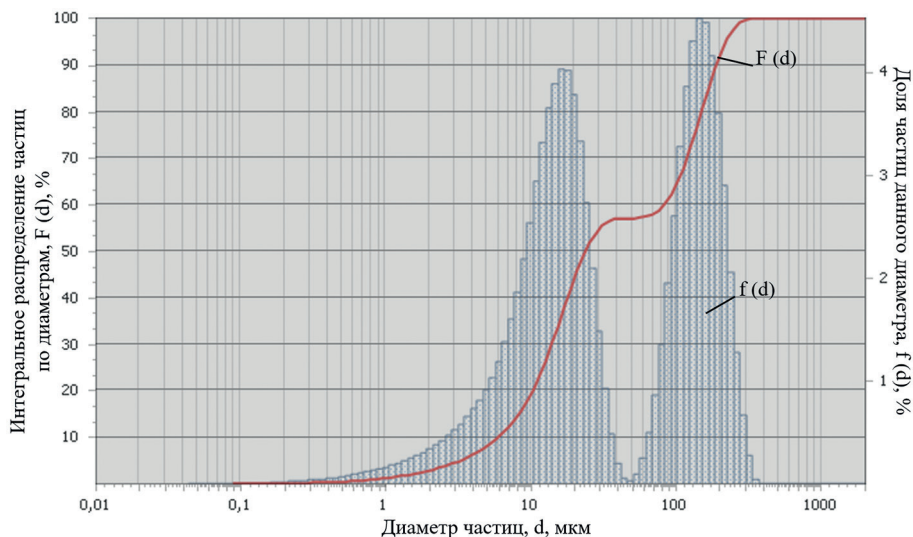


Рис. 2. Дифференциальная ( $f(d)$ ) и интегральная ( $F(d)$ ) кривые распределения частиц пыли (пласт E-5, пыль с пересыпа конвейера лавы)

Fig. 2. Differential ( $f(d)$ ) and integral ( $F(d)$ ) curves of dust particle distribution (seam E-5, the overflow of the lava conveyor)

частиц пыли, обладающих наиболее высокими взрывчатыми свойствами. Также была определена объемная доля частиц до 10 мкм (табл. 1). Анализ данных табл. 1 показывает, что в лаве отло-

жившаяся пыль на 80% является взрывчатой, причем весовая доля наиболее взрывчатых частиц размером до 40 мкм составляет 70%, что снижает нижний концентрационный предел взрываемо-

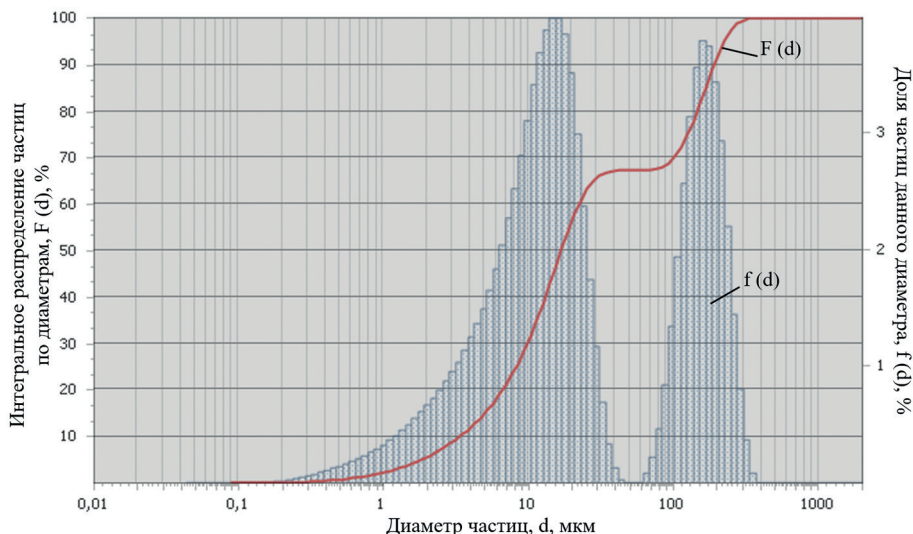


Рис. 3. Дифференциальная ( $f(d)$ ) и интегральная ( $F(d)$ ) кривые распределения частиц пыли (пласт E-5, пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы)

Fig. 3. Differential ( $f(d)$ ) and integral ( $F(d)$ ) curves of dust particle distribution (seam E-5, dust from the transfer from conveyor to conveyor at a distance of 200 m from the lava)

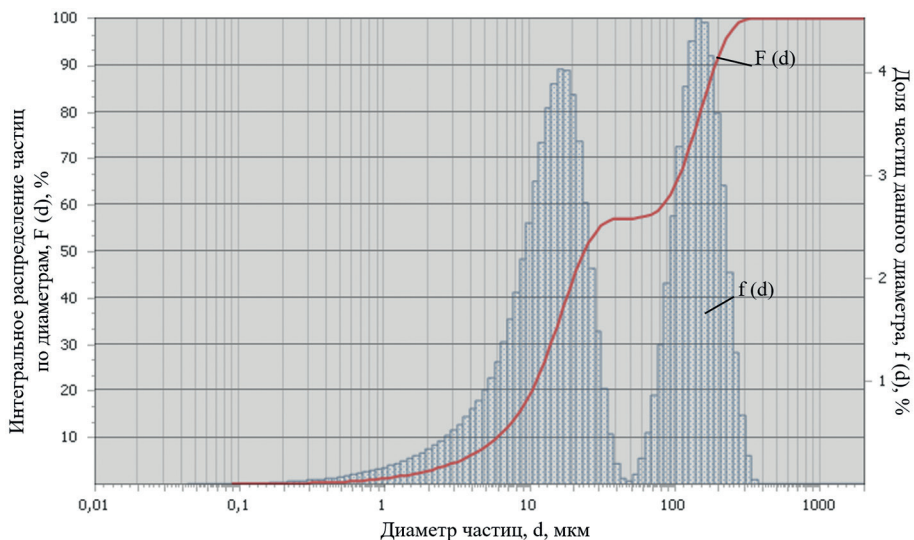


Рис. 4. Дифференциальная ( $f(d)$ ) и интегральная ( $F(d)$ ) кривые распределения частиц пыли (пласт E-5, пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы)

Fig. 4. Differential ( $f(d)$ ) and integral ( $F(d)$ ) curves of dust particle distribution (seam E-5, dust from the transfer from conveyor to conveyor in the main conveyor shaft at a distance of 3200 m from the lava)

сти (НКПВ) от 1,5 до 4,3 раза. Пыль с пересыпа лавного конвейера на 72% является взрывчатой. Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы на 65% является взрывчатой. И только объемная доля взрывчатой пыли с пересыпа с конвейера на

конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы снижается и составляет 55%.

Примечание: ранее было отмечено, что размером частиц, при котором пыль перестает быть взрывчатой, считается от 125 до 170 мкм, поэтому в наших

Таблица 1

**Объемная доля фракционного состава пылевых частиц**  
**Volume fraction of fractional composition of dust particles**

№ п/п	Места отбора проб пыли	Марка угля	Весовая доля фракции до 40 мкм, %	Весовая доля фракции от 40 до 100 мкм, %	Весовая доля фракции от 100 до 300 мкм, %	Содержание тонких фракций до 10 мкм, %
1	Пыль после комбайна в лаве	Ж	70	10	20	30
2	Пыль с пересыпа конвейера лавы	Ж	68	4	28	30
3	Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер на расстоянии 200 м от лавы	Ж	58	7	25	20
4	Пыль с пересыпа с конвейера на конвейер в магистральном конвейерном штреке на расстоянии 3200 м от лавы	Ж	44	11	45	14

Таблица 2

**Количественные значения десорбированных углеводородов из угля и угольной пыли**  
**Quantitative values of desorbed hydrocarbons from coal and coal dust**

Параметры	Углеводороды											Σ C-C <sub>6</sub> Σ C-C <sub>5</sub> Σ C <sub>4</sub> -C <sub>6</sub>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>			
Эффективный диаметр молекулы, нм	0,414	0,537	0,495	0,632	0,599	0,707	0,674	0,780	0,839			
Относительная молекулярная масса	16,043	30,070	28,054	44,097	42,081	58,124	56,100	72,147	86,173			
Плотность, кг/нор.м <sup>3</sup>	0,715	1,357	1,260	2,019	1,915	2,703	2,668	3,172	3,638			
Пределы взрываемости, об. %	5,0–14,0	3,2–12,5		2,4–9,5		1,9–8,4		1,4–7,8	1,25–6,9			
Количество десорбированного газа из угля пласта Е-5, см <sup>3</sup> /кг; содержание в газовой смеси, об. %	2,25	0,59	0,29	7,03	0,45	4,66	0тс.	0,21	0,29			15,8
	14,3	3,7	1,8	44,6	2,9	29,5		1,3	1,8			<u>10,16</u> 5,61
Количество десорбированного газа из угольной пыли пласта Е-5, см <sup>3</sup> /кг; содержание в газовой смеси, об. %	1,31	0,29	0,21	1,45	0,11	9,74	0,09	3,96	2,31			19,5
	6,7	1,5	1,1	7,4	0,6	50,0	0,5	20,3	11,9			<u>3,26</u> 16,21
Температура самовоспламенения, °С	595	515	435	470		405		286	233			
Примечание: Σ — сумма углеводородов, см <sup>3</sup> /кг.												

оценках при выборе верхней границы взрываемости пыли в 100 мкм опасность пыли в расчетах занижена.

Содержание респирабельной пыли в очистном забое является высоким и составляет 30%, что представляет угрозу как для здоровья горнорабочих очистного забоя, так и с точки зрения взрывоопасности угольной пыли [16, 17], так как сила взрыва в отдельных случаях достигает максимума при диаметре частиц менее 10 мкм.

По данным многих авторов [18, 19] следует, что с увеличением объемной доли пылевых фракций 60 и 75 мкм взрывчатость угольной пыли быстро растет. Размер частиц пыли оказывает существенное влияние на ее взрывчатые свойства таким образом, что при большой массовой концентрации мелкодисперсных частиц нижний концентрационный предел взрываемости пыли может снизиться в 5,8 раз.

По результатам исследований авторов объемная доля пылевых фракций до 40 мкм в лаве № 4-1-5-9 составляет более 70% и, следовательно, НКПВ пыли пласта Е-5 может быть снижен от 1,5 до 4 раз. Нижний предел взрывчатости снижается с 9 до 24 г/т [ $36 \text{ (г/т)}/1,5 = 24 \text{ (г/т)}$ ];  $36 \text{ (г/т)}/4 = 9 \text{ (г/т)}$ ]. Учитывая, что в лаве предельно допустимое содержание метана составляет 1%, получаем дальнейшее снижение НКПВ на 50%. В итоге НКПВ пыли в лаве будет составлять 4,5–12 г/т. Проведенные аналогичные расчеты для конвейерного штрека (с учетом ПДК метана 0,5%) дают прогнозную оценку НКПВ пыли 6,75–18 г/т.

Для изучения кинетики десорбции углеводородных газов были выбраны следующие температуры термодегазации: 150 °С, 200 °С, 250 °С. Исследования проводились для углей пласта Е-5, а также для угольной пыли этого пласта. Изучались пылевые фракции раз-

мером менее 0,07 мм; 0,07–0,1 мм; 0,1–0,25 мм; 0,25–0,5 мм; 0,5–1,0 мм, а также общая масса угольной пыли. Результаты исследований представлены в табл. 2, 3.

Из анализа данных табл. 2 следует, что количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли (19,5 см<sup>3</sup>/кг), на 23 % больше, чем количество углеводородов, извлеченных из угля (15,8 см<sup>3</sup>/кг). Содержание углеводородов, извлеченных из угля, от метана до пропана (10,16 см<sup>3</sup>/кг) составляет 64,3%, а из угольной пыли содержание извлеченных аналогичных углеводородов составляет всего лишь 16,7%, а остальные 83% представлены тяжелыми углеводородами от бутана до гексана т.е. угольная пыль адсорбирует преимущественно бутан, пентан, гексан. Плотность этих газов составляет от 2,703 до 3,638 кг/нор.м<sup>3</sup>, поэтому они оседают на почву выработки и задерживаются в ламинарном пограничном слое воздушного потока, проходящего по выработке.

К явлениям, приводящим к самопроизвольному снижению поверхностного натяжения, относится адсорбция [20–22]. Адсорбция происходит на границе раздела фаз. В нашем случае пыль – адсорбент, тяжелые углеводороды – адсорбат. Количественно адсорбция измеряется массой адсорбата, приходящейся на единицу массы адсорбента. Мы можем количественно оценить массу адсорбированного газа угольной пылью, для этого составим разность между количеством десорбированного газа угольной пылью и углем:  $19,5 - 15,8 = 3,7 \text{ (см}^3\text{/кг)}$ . Следовательно, величина адсорбции углеводородов угольной пылью в данном случае равна 3,7 см<sup>3</sup>/кг.

Ископаемые угли – это пористые тела, внутри которых имеются поры, которые могут быть заполнены газом или жидкостью [23, 24]. Их относят к своеобразному классу природных сорбентов,

получивших название «молекулярные сита». Более того, в ископаемых углях преобладают микропоры диаметром 0,5–1,5 нм, что, следует заметить, создает трудности в воздействии на микропорный объем угля для извлечения угольного метана при проведении дегазации и требует предварительного создания системы транспортных трещин.

Общая пористость углей марки Ж обычно варьируется в диапазоне примерно от 5–10% до 15–20%, иногда достигая 25% и более для некоторых разновидностей угля. Угольная пыль обладает повышенной сорбционной способностью по сравнению с углем вследствие большой реакционной способности, особенно для тонкодисперсных фракций пыли, что также определяет их повышенную пожаровзрывоопасность. Кроме того, пыль может находиться как в состоянии аэрозоля, так и быть осевшей на твердых поверхностях. Удельная поверхность пылевых частиц может достигать 1000 м<sup>2</sup>/г и более. На рис. 5 представлено изображение разветвленной поверхности частиц угольной пыли.

Анализ дисперсного состава отложившейся пыли в лаве 4-5-1-9 показывает, что в воздух рабочей зоны поступает пыль с содержанием частиц PM10 от 15 до 30% и частиц PM2,5 от 0 до 5%, которая дольше висит в воздухе и легче переносится по выработке.

При выполнении исследований было установлено, что угольная пыль пласта E-5 содержит больше углеводородов (бутана, гептана, гексана) по сравнению с углеводородами, извлеченными из углей (пропана, бутана). Это можно объяснить следующим: при разрушении угля в воздушный поток лавы выделяются сорбированные в угле углеводородные газы от метана до гексана, которые переносятся воздушным потоком по горным выработкам. Вследствие большой разницы в плотностях газов и их динамической активности происходит стратификация углеводородов по высоте воздушного потока, в результате чего метан, как наиболее легкий газ, поднимается к кровле выработки, а пропан, бутан и гексан опускаются в нижнюю часть воздушного потока и оседают на почву выработки, так как плотность этих газов от 2 до 4 раз больше плотности воздуха. В результате дальнего действия адсорбционных сил происходит адсорбция тяжелых углеводородов угольной пылью. Если эффективный диаметр молекулы метана 0,414 нм, то для молекул пропана, бутана и гексана эти значения равны соответственно 0,632; 0,707; 0,839 нм, то есть для размера микропор от 1 до 1,5 нм адсорбционное взаимодействие пыли с тяжелыми углеводородами сильнее, чем с метаном и этаном. И чем больше диа-

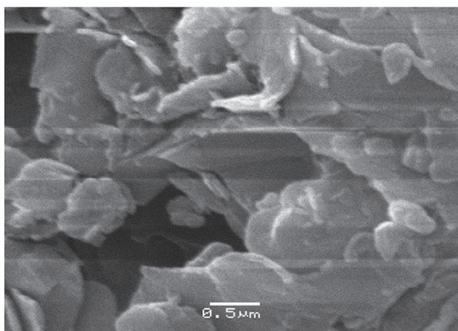
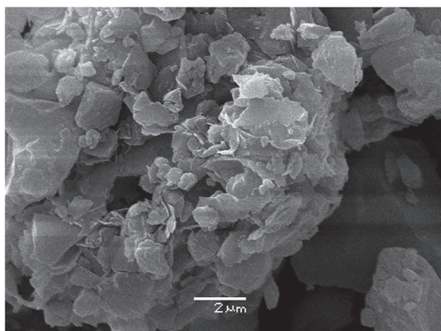


Рис. 5. Изображение поверхности частиц угольной пыли пласта E-5

Fig. 5. Image of the surface of coal dust particles from the seam E-5

метр молекулы углеводородного газа, тем сильнее молекулярное притяжение.

Сравним силу межмолекулярного адсорбционного взаимодействия в угле и в пыли, для этого возьмем отношение большего количества адсорбированного газа к меньшему для всех индивидуальных углеводородов. Получим, что в

угле для метана сила адсорбционного взаимодействия в 1,7 раза больше, чем в пыли; для этана и пропана также адсорбция в угле в 2,0 раза больше, чем в пыли. А вот для бутана сила адсорбционного взаимодействия в пыли в 2,1 раза больше, чем в угле. И особенно обращает на себя внимание тот факт, что пентана

Таблица 3

**Количество и состав десорбированных углеводородов из угольной пыли пласта E-5**  
**Quantity and composition of desorbed hydrocarbons from coal dust of the seam E-5**

T, °C	Углеводороды									Σ <sup>1)</sup> , см <sup>3</sup> /кг
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	
<b>Фракция пыли менее 0,07</b>										
150	1,600	0,240	0,090	0,450	0,000	3,300	0,080	2,200	0,700	8,660
200	0,500	0,000	0,000	0,210	0,000	5,200	0,000	1,600	1,260	8,770
Σ										17,43
<b>Фракция пыли 0,07–0,1</b>										
150	0,730	0,100	0,060	0,460	0,000	2,230	0,000	0,750	0,520	4,850
200	1,700	0,320	0,220	1,980	0,120	4,950	0,000	1,910	1,810	13,010
250	3,080	0,640	0,710	2,080	0,350	6,710	0,120	2,600	3,460	19,750
Σ										37,61
<b>Фракция пыли 0,1–0,25</b>										
150	0,28	0,04	0,02	0,26	0	1,26	0,01	0,54	0,45	2,857
200	1,290	0,230	0,120	1,920	0,000	5,390	0,050	1,310	1,050	11,360
250	3,690	0,790	0,830	3,890	0,380	9,350	0,170	3,070	2,920	25,090
Σ										39,32
<b>Фракция пыли 0,25–0,5</b>										
150	0,900	0,110	0,090	1,300	0,120	2,580	0,000	0,900	0,700	6,700
200	2,070	0,430	0,260	4,130	0,240	4,240	0,000	1,290	1,280	13,940
250	3,270	0,750	0,720	5,380	0,120	6,090	0,120	2,170	2,150	20,770
Σ										41,41
<b>Фракция пыли 0,5–1,0</b>										
150	0,590	0,100	0,050	0,640	0,040	2,330	0,000	0,600	0,850	5,200
200	1,330	0,260	0,150	2,040	0,080	4,270	0,050	1,270	1,180	10,630
250	3,450	0,860	0,730	4,070	0,440	5,460	0,230	2,040	2,540	19,820
Σ										35,65
<b>Угольная пыль; вся масса</b>										
150	1,02	0,16	0,06	0,56	0	1,72	0	0,51	0,28	4,31
200	1,93	0,41	0,22	1,54	0,13	3,9	0,07	0,98	0,77	9,95
250	1,31	0,29	0,21	1,45	0,11	9,74	0,09	3,96	2,31	19,5
Σ										33,76

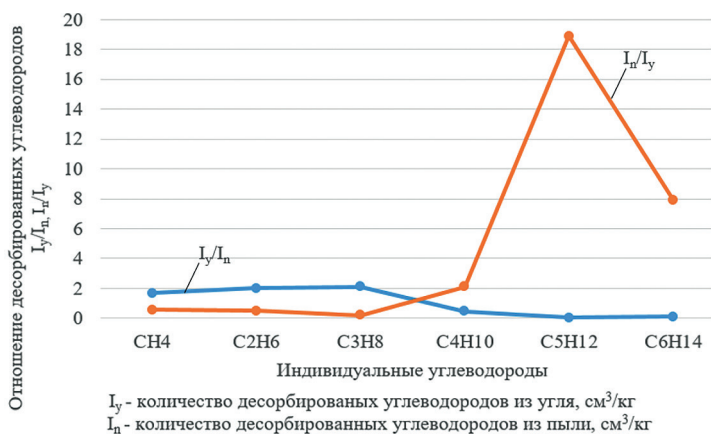


Рис. 6. Соотношение сил адсорбционного взаимодействия в угле и в пыли угля пластов средней стадии метаморфизма

Fig. 6. Ratio of adsorption interaction forces in coal and coal dust from mid-stage metamorphic seams

в 18,9 раз больше в пыли, чем в угле, и гексана также в 8 раз больше в пыли, чем в угле. Повышенное содержание тяжелых углеводородов в угольной пыли по сравнению с углем произошло в результате сорбции пылью углеводородов, содержащихся в шахтном воздухе (рис. 6).

Во время взрыва метана и угольной пыли на шахте «Листвяжная» в 2021 г. находящиеся в шахте горняки интуитивно классифицировали аварию как взрыв «газовой» пыли.

Результаты исследования кинетики десорбции углеводородных газов из угольной пыли представлены в табл. 3. Анализ данных табл. 3 показывает, что при всех температурах проведенной термодезгазации из всех фракций пыли десорбируются бутан, пентан, гексан в количестве, значительно превышающем количество десорбируемого метана. Но этого и следовало ожидать, так как ранее было показано, что из угольной пыли десорбируется углеводородов на

Таблица 4

**Процентное значение десорбированного бутана из всех фракций пыли и общей ее массы**

**Percentage value of desorbed butane from all dust fractions and its total mass**

Температура, °С	Количество десорбированных углеводородов, %, по размерам фракций, мм					
	0,07–0,1 мм	0,1–0,25 мм	0,25–0,5 мм	0,5–1,0 мм	вся масса пыли (0,07–1,0 мм)	среднее значение
150	33%	13%	42%	42%	18%	29,6%
200	40%	44%	27%	36%	22%	33,8%
250	27%	43%	31%	22%	60%	36,6%

Температура, °С	Размер фракций пыли, мм					
	0,07–0,1 мм	0,1–0,25 мм	0,25–0,5 мм	0,5–1,0 мм	вся масса пыли (0,07–1,0 мм)	среднее значение
	Количество десорбированного бутана (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ), %					
150	33	13	42	42	18	29,6

23,4% больше, чем из угля, причем преимущественно  $C_4-C_6$ , из них больше всего десорбируется бутана.

Поскольку из угольной пыли исследованных образцов угля марки Ж больше всего выделилось бутана, особенно при температуре термодезгазации 250 °С, были проведены исследования по установлению кинетики выделения бутана в зависимости от трех исследуемых температур дегазации. Рассчитывалось приращение десорбированного бутана при нагревании на 150, 200 и 250 °С.

Проанализировав колонку с десорбированным бутаном по всем фракциям пыли и по всей массе пыли по трем температурам термодезгазации, можно отметить, что результаты по всем фракциям пыли при всех температурах примерно одинаковы. Расчетные данные процентного значения десорбированного бутана из всех фракций пыли и общей ее массы (для постоянного объема в 1 г) представлены в табл. 4.

Можно сделать вывод, что для частиц пыли размером больше 70 мкм десорбция бутана больше зависит от температуры дегазации, а не от размера частиц. Возможно, что для частиц размером менее 70 мкм кинетика дегазации будет другой.

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 150 °С имеют следующий вид:

$$I_{\text{пропан},150} = -21,74 \cdot d^3 + 2,43 \cdot d^2 - 7,98 \cdot d + 0,97; \quad (1)$$

$$I_{\text{бутан},150} = -48,84 \cdot d^3 + 78,12 \cdot d^2 - 30,64 \cdot d + 4,56, \quad (2)$$

где  $I_{\text{пропан},150}$ ;  $I_{\text{бутан},150}$  — количество десорбированного пропана и бутана соответственно при температуре дегазации 150 °С,  $\text{см}^3/\text{кг}$ ;  $d$  — размер частиц угольной пыли, мм.

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 200 °С имеют следующий вид:

$$I_{\text{пропан},200} = -16,58 \cdot d^3 + 13,76 \cdot d^2 + 4,345 \cdot d + 0,521; \quad (3)$$

$$I_{\text{бутан},200} = 21,45 \cdot d^3 - 29,76 \cdot d^2 + 9,56 \cdot d + 4,5. \quad (4)$$

Функциональные зависимости десорбции пропана и бутана при 250 °С имеют следующий вид:

$$I_{\text{пропан},250} = 3,99 \cdot d^3 - 17,98 \cdot d^2 + 18,1 \cdot d + 0,54; \quad (5)$$

$$I_{\text{бутан},250} = 101,9 \cdot d^3 - 162,89 \cdot d^2 + 65,01 \cdot d + 1,8. \quad (6)$$

Газовая ситуация на участках осложняется резким повышением нагрузок на очистные и проходческие забои. При больших нагрузках на очистной забой (15–18 тыс. т угля в сутки) в процессе разрушения угля комбайном кроме метана в шахтную атмосферу могут выделяться находящиеся в пласте тяжелые углеводороды, особенно это настораживает в отношении высокогазоносных пластов марок Д, Ж, КЖ.

Температура воспламенения гексана 233 °С, бутана — 405 °С, пропана — 470 °С. Температура воспламенения метана выше, чем у этих газов, и составляет 650–750 °С. Нижние концентрационные пределы взрываемости: гексан — 1,25%, бутан — 1,9%, пропан — 2,4%, метан — 5%. При работе комбайнов, шахтных ленточных конвейеров и другого оборудования на выемочном участке могут возникать температуры воспламенения тяжелых углеводородов. Таким образом, от источника теплового импульса могут сначала вспыхнуть тяжелые углеводороды, которые дадут искру для взрыва метана [25–27]. При взрыве метана находящаяся в выработке угольная пыль поднимается в воздух, нагревается и из нее выделяются сорбированные ею тяжелые углеводороды, которые придают значительное усиление мощности взрыва метана и угольной пыли.

## Заключение

Рудничная атмосфера высокопроизводительных угольных шахт, разрабатывающих высокогазоносные угольные пласты средней стадии метаморфизма, опасные по взрывам угольной пыли, должна квалифицироваться как смесь «воздух — метан — гомологи метана — сорбированная тяжелыми углеводородами угольная пыль».

Присутствие в рудничной атмосфере тяжелых углеводородов создает повышенную опасность, так как эти газы образуют взрывчатые смеси с воздухом при более низких концентрациях, чем метан.

Установлено, что в лаве отложившаяся пыль на 80% является взрывчатой, причем весовая доля наиболее взрывчатых частиц размером до 40 мкм составляет 70%, что снижает НКПВ от 1,5 до 4,3 раз. Количество углеводородов, извлеченных из угольной пыли, на 23% больше, чем количество углеводородов, извлеченных из угля. Угольная пыль адсорбирует преимущественно бутан, пентан, гексан. Плотность этих газов составляет от 2 до 3,5 раз больше плотности воздуха, поэтому они оседают на почву выработки и задерживаются в ламинарном пограничном слое воздушного потока, проходящего по выработке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li S., Gao L. An investigation of the process of risk coupling and the main elements of coal-mine gas-explosion risk // *Fire*. 2025, vol. 8, no. 8, article 294. DOI: 10.3390/fire8080294.
2. Босиков И. И., Ключев Р. В., Силаев И. В., Стась Г. В. Комплексная оценка трудноформализуемых вентиляционно-технологических процессов на угольных шахтах // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 516–527. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-516-527.
3. Загоршменный И. М., Сизин П. Е., Уварова И. Ф., Обвинцева Н. Ю., Дианов П. А. Оценка влияния отбитого угля на распределение концентрации метана в призабойном пространстве // *Уголь*. — 2025. — № 10. — С. 94–98. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-94-98.
4. Liang Y., Shi B., Yue J., Zhang Ch., Shen X., Hu T., Han Q. Desorption characteristics of CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> mixed gas in heavy hydrocarbon-rich coal seams // *ACS Omega*. 2024, vol. 9, no. 14, pp. 16176–16186. DOI: 10.1021/acsomega.3c10156.
5. Adsul T., Ghosh S., Ojha A., Bhattacharyya S., Varma A. K. Spectral narratives of microstructural restyling and their controls on hydrocarbon generation potential from coal // *International Journal of Coal Science & Technology*. 2023, vol. 10, article 33. DOI: 10.1007/s40789-023-00591-8.
6. Zhou S., Yang Y., Shang H. Adhesion behavior of underground coal dust with fused silica: effects of relative humidity and particle size // *Processes*. 2024, vol. 12, no. 4, article 735. DOI: 10.3390/pr12040735.
7. 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.
8. Yu J., Li Z., Yang D., Liu Y. Dynamic risk assessment of gas accumulation during coal and gas outburst catastrophes based on analytic hierarchy process and information entropy // *Processes*. 2025, vol. 13, no. 5, article 1305. DOI: 10.3390/pr13051305.
9. Невская Е. Е., Медведев Д. А., Маховиков А. Б., Филясова Ю. А. Информационные технологии для систематизации способов повышения безопасности в угольных шахтах // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 627–635. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-627-635.
10. Петров Ю. С., Габараев О. З., Соколов А. А. Обобщенная оценка влияния горного предприятия на окружающую природную среду // *Горный журнал*. — 2015. — № 8. — С. 25–27. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.06.
11. Зиновьева О. М., Колесникова Л. А., Меркулова А. М., Смирнова Н. А. К вопросу оценки экологического состояния окружающей среды для достижения устойчивого развития угле-

бывающих регионов России // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 35–43. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-35-43.

12. Лебедев В. С., Скопинцева О. В. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность // Горный журнал. — 2017. — № 4. — С. 84–86. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17.

13. Романченко С. Б., Корнев А. В. Инновационные методы исследований пылевой взрывоопасности углей // Записки Горного института. — 2025. — Т. 274. — С. 129–141.

14. 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, vol. 24, no. 1, pp. 105–110. DOI: 10.6180/jase.202102\_24(1).0014.

15. Жихарев С. Я., Цыганков В. Д., Родионов В. А., Исаевич А. Г. Оптимизация процессов пылеподавления при ведении подземных горных работ на основе данных натурных экспериментов и моделирования в программе ANSYS Fluent // Горный журнал. — 2023. — № 11. — С. 70–75. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.11.

16. Guo Y., Deng P., Zhang B., Liu X., Zhang Y., Wei X. Study on the inhibitory effect and mechanism of modified ultrafine ABC powder on CH<sub>4</sub>/coal dust coexistence explosions // Processes. 2025, vol. 13, no. 3, article 858. DOI: 10.3390/pr13030858.

17. Blokhin D. I., Dokuchaeva A. I., Zakorshmenniy I. M., Kobylkin A. S., Koporulina E. V. The influence of the mine dust mineral composition on the characteristics of thermal destruction processes // Journal of Physics: Conference Series. 2024, vol. 2697, no. 1, article 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2697/1/012059.

18. Родионов В. А., Скрипник И. Л., Ивахнюк С. Г. Исследование характеристик самовозгорания каменного угля // Безопасность труда в промышленности. — 2025. — № 4. — С. 7–13. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-7-13.

19. Dong X., Liu T., Wang X., Xu X. Fuzzy structured element integrated decision of metamorphism on coal dust ignition hazard rating // Journal of Physics Conference Series. 2023, vol. 2549, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2549/1/012013.

20. 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.

21. Голубков В. А., Горенкова Г. А., Ворожцов Е. П., Беспалова М. А., Бортников С. В. Добавка на основе олеата натрия и льняного масла для углепылеподавляющих растворов // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8. — № 4. — С. 341–349. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-02-79.

22. Fu W., Kang J., Liang W., Deng P. Effect of temperature on the wetting performance of coal powder by different surfactant solutions: experimental and molecular dynamics simulation study // Scientific Reports. 2026, vol. 16, article 2820. DOI: 10.1038/s41598-025-32648-w.

23. Ren J., Song Zh., Li B., Liu J., Lv R., Liu G. Structure feature and evolution mechanism of pores in different metamorphism and deformation coals // Fuel. 2021, vol. 283, article 119292. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119292.

24. Patrakov Y. F., Semenova S. A., Papina T. A., Yarkova A. V. Dependence of surface wettability and filtration capacity of coals on the degree of metamorphism // Solid Fuel Chemistry. 2025, vol. 59, pp. 265–271. DOI: 10.3103/S0361521925700156.

25. 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.

26. Kamran M., Chaudhry W., Wattimena R. K., Rehman H., Martyushev D. A. A multi-criteria decision intelligence framework to predict fire danger ratings in underground engineering structures // Fire. 2023, vol. 6, no. 11, article 412. DOI: 10.3390/fire6110412.

27. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Лебедев К. С., Ерастов А. Ю., Хаймин С. А. Самовоспламенение пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок // Горная промышленность. — 2024. — № 2. — С. 121–126. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-121-126. **VIAS**

## REFERENCES

1. Li S., Gao L. An investigation of the process of risk coupling and the main elements of coal-mine gas-explosion risk. *Fire*. 2025, vol. 8, no. 8, article 294. DOI: 10.3390/fire8080294.

2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V., Stas G. V. Comprehensive assessment of formalized ventilation difficulty and technological processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3, pp. 516 – 527. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-516-527.
3. Zakorshmenyi I. M., Sizin P. E., Uvarova I. F., Obvintseva N. Yu., Dianov P. A. Assessing the influence of broken coal on methane concentration distribution in the face area. *Ugol'*. 2025, no. 10, pp. 94 – 98. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-10-94-98.
4. Liang Y., Shi B., Yue J., Zhang Ch., Shen X., Hu T., Han Q. Desorption characteristics of CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> mixed gas in heavy hydrocarbon-rich coal seams. *ACS Omega*. 2024, vol. 9, no. 14, pp. 16176 – 16186. DOI: 10.1021/acsomega.3c10156.
5. Adsul T., Ghosh S., Ojha A., Bhattacharyya S., Varma A. K. Spectral narratives of microstructural restyling and their controls on hydrocarbon generation potential from coal. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2023, vol. 10, article 33. DOI: 10.1007/s40789-023-00591-8.
6. Zhou S., Yang Y., Shang H. Adhesion behavior of underground coal dust with fused silica: effects of relative humidity and particle size. *Processes*. 2024, vol. 12, no. 4, article 735. DOI: 10.3390/pr12040735.
7. 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.
8. Yu J., Li Z., Yang D., Liu Y. Dynamic risk assessment of gas accumulation during coal and gas outburst catastrophes based on analytic hierarchy process and information entropy. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 5, article 1305. DOI: 10.3390/pr13051305.
9. Nevskaja E. E., Medvedev D. A., Makhovikov A. B., Filyasova Yu. A. Information technologies for systematization of methods improving safety in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 2, pp. 627 – 635. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-627-635.
10. Petrov Yu. S., Gabaraev O. Z., Sokolov A. A. Generalized evaluation of ecological impact of a mine. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 25 – 27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.06.
11. Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M., Smirnova N. A. On the issue of assessing the ecological condition of the environment to achieve sustainable development of coal-mining regions of Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 35 – 43. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-35-43.
12. Lebedev V. S., Skopintseva O. V. Residual coalbed gas components: Composition, content, hazard. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 4, pp. 84 – 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17.
13. Romanchenko S. B., Kornev A. V. Innovative research methods for the dust explosion hazard of coals. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 274, pp. 129 – 141. [In Russ].
14. 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, vol. 24, no. 1, pp. 105 – 110. DOI: 10.6180/jase.202102\_24(1).0014.
15. Zhikharev S. Ya., Tsygankov V. D., Rodionov V. A., Isaevich A. G. Optimization of dust suppression processes during underground mining based on full-scale experimentation and ANSYS Fluent simulation. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 11, pp. 70 – 75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.11.
16. Guo Y., Deng P., Zhang B., Liu X., Zhang Y., Wei X. Study on the inhibitory effect and mechanism of modified ultrafine ABC powder on CH<sub>4</sub>/coal dust coexistence explosions. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 3, article 858. DOI: 10.3390/pr13030858.
17. Blokhin D. I., Dokuchaeva A. I., Zakorshmenyi I. M., Kobylkin A. S., Koporulina E. V. The influence of the mine dust mineral composition on the characteristics of thermal destruction processes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024, vol. 2697, no. 1, article 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2697/1/012059.
18. Rodionov V. A., Skripnik I. L., Ivakhnyuk S. G. Investigating properties of hard coal spontaneous ignition. *Occupational Safety in Industry*. 2025, no. 4, pp. 7 – 13. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-7-13.
19. Dong X., Liu T., Wang X., Xu X. Fuzzy structured element integrated decision of metamorphism on coal dust ignition hazard rating. *Journal of Physics Conference Series*. 2023, vol. 2549, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2549/1/012013.

20. 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.

21. Golubkov V. A., Gorenkova G. A., Vorozhtsov E. P., Bespalova M. A., Bortnikov S. V. Chemical additive based on sodium oleate and linseed oil for preparation coal dust suppression composition. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 341–349. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-02-79.

22. Fu W., Kang J., Liang W., Deng P. Effect of temperature on the wetting performance of coal powder by different surfactant solutions: experimental and molecular dynamics simulation study. *Scientific Reports*. 2026, vol. 16, article 2820. DOI: 10.1038/s41598-025-32648-w.

23. Ren J., Song Zh., Li B., Liu J., Lv R., Liu G. Structure feature and evolution mechanism of pores in different metamorphism and deformation coals. *Fuel*. 2021, vol. 283, article 119292. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119292.

24. Patrakov Y. F., Semenova S. A., Papina T. A., Yarkova A. V. Dependence of surface wettability and filtration capacity of coals on the degree of metamorphism. *Solid Fuel Chemistry*. 2025, vol. 59, pp. 265–271. DOI: 10.3103/S0361521925700156.

25. 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.

26. Kamran M., Chaudhry W., Wattimena R. K., Rehman H., Martyushev D. A. A multi-criteria decision intelligence framework to predict fire danger ratings in underground engineering structures. *Fire*. 2023, vol. 6, no. 11, article 412. DOI: 10.3390/fire6110412.

27. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Lebedev K. S., Erastov A. Yu., Khaymin S. A. Self-ignition of dust and gas-air mixtures in the atmosphere of mine workings. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 2, pp. 121–126. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-2-121-126.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скопинцева Ольга Васильевна<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
профессор, профессор, e-mail: skopintseva54@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

Баловцев Сергей Владимирович<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
доцент, профессор, e-mail: balovcev@yandex.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

Рыбичев Алексей Алексеевич<sup>1</sup> — ассистент,  
e-mail: rybichev@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0005-9269-201X,

<sup>1</sup> Университет науки и технологий МИСИС.

**Для контактов:** Рыбичев А.А., e-mail: rybichev@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

O.V. Skopintseva<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor, e-mail: skopintseva54@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,

S.V. Balovtsev<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Assistant Professor, e-mail: balovcev@yandex.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,

A.A. Rybichev<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: rybichev@yandex.ru,  
ORCID ID: 0009-0005-9269-201X,

<sup>1</sup> University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Rybichev, e-mail: rybichev@yandex.ru.

Получена редакцией 19.12.2025; получена после рецензии 26.01.2026; принята к печати 10.04.2026.

Received by the editors 19.12.2025; received after the review 26.01.2026; accepted for printing 10.04.2026.