ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11):140-152
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.4:622.8 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ СВОЙСТВ ОСТАТОЧНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ГАЗОНАПОЛНЕННЫМИ РАСТВОРАМИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

О.В. Скопинцева[1], А.А. Рыбичев[1], С.В. Баловцев[1]

[1] Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: rybichev@yandex.ru

Аннотация: Установлена закономерность распределения остаточных углеводородов по маркам углей Донецкого и Кузнецкого бассейнов и оценена роль тяжелых углеводородов в системе взрывопожароопасности угольных шахт. Содержание тяжелых углеводородов в целом больше в углях Донбасса по сравнению с углями Кузбасса, характер распределения остаточных газов по маркам углей примерно одинаковый. Наибольшее содержание остаточных газов углей находится в углях марок Ж, КЖ. Остаточные газы углей более чем на 80% представлены тяжелыми углеводородами во всех марках углей для обоих бассейнов. В углях марки Ж количество пропана и бутана превышает содержание остальных газов в 3–7 раз, поэтому расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля чреват недооценкой повышенной потенциальной опасности взрывов тяжелых углеводородов. Содержание горючих газов в остаточных газах углей марки Ж колеблется от 27 до 53%, в то время как содержание балластных газов достигает наименьшего значения (46,5%), что увеличивает концентрационные пределы взрываемости, но не обеспечивает взрывопожаробезопасность. Предложена технология увеличения содержания балластных газов в остаточных углеводородных газах угольных пластов марки Ж путем нагнетания в угольный пласт газонаполненного раствора поверхностно-активных веществ.

Ключевые слова: угольная пыль, метан, тяжелые углеводороды, остаточные газы угольных пластов, балластные газы, нейтрализация взрывчатых свойств, взрывопожаробезопасность, поверхностно-активные вещества, газонаполненные растворы.

Для цитирования: *Скопинцева О. В., Рыбичев А. А., Баловцев С. В.* Нейтрализация взрывчатых свойств остаточных углеводородов угольных пластов газонаполненными растворами поверхностно-активных веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 140–152. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140.

Neutralization of the explosive properties of residual hydrocarbons in coal seams by gas-filled solutions of surfactant agents

O.V. Skopintseva[1], A.A. Rybichev[1], S.V. Balovtsev[1]

[1] University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: rybichev@yandex.ru

Abstract: The distribution of residual hydrocarbons by coal grades in the Donetsk and Kuznetsk basins has been established, and the role of heavy hydrocarbons in the explosion and fire hazard system of coal mines has been evaluated. The content of heavy hydrocarbons is generally higher in Donbas coal than in Kuznetsk coal, and the distribution of residual gases by coal grades is approximately the same. The highest content of residual coal gases is found in coal grades J and KJ. Residual coal gases are more than 80% represented by heavy hydrocarbons in all coal grades for both basins. In grade J coal, the amount of propane and butane exceeds the content of other gases by 3–7 times, so calculating the relative methane abundance of mining areas and preparation workings based on the difference between the natural methane content of the developed seam and the residual methane content of the coal may underestimate the increased potential for heavy hydrocarbon explosions. The content of combustible gases in the residual gases of coal grade J varies from 27 to 53%, while the content of ballast gases reaches the lowest value (46.5%), which increases the concentration limits of explosibility, but does not ensure explosion and fire safety. A technology has been proposed to increase the content of ballast gases in residual hydrocarbon gases of coal layers of grade J by injecting a gas-filled surfactant solution into the coal seam.

Key words: coal dust, methane, heavy hydrocarbons, residual gases of coal seams, ballast gases, neutralization of explosive properties, explosion and fire safety, surfactants, gas-filled solutions.

For citation: Skopintseva O. V., Rybichev A. A., Balovtsev S. V. Neutralization of the explosive properties of residual hydrocarbons in coal seams by gas-filled solutions of surfactant agents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11):140-152. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_140.

Введение

Угольная промышленность остается одной из ключевых отраслей энергетики, однако она сопряжена с высокими рисками (среди которых особое место занимают взрывы газа и пыли, эндогенные и экзогенные пожары [1 — 3], представляющие серьезную угрозу для жизни и здоровья шахтеров), приводящими к значительным экономическим потерям и наносящими ущерб окружающей среде [4 — 6]. В связи с этим разработка и внедрение эффективных методов предотвращения взрывов газа и пыли, пожаров являются приоритетными задачами обеспечения безопасности в угольных шахтах [7 — 9].

При вскрытии пласта и снижении пластового давления происходит интенсивное выделение свободных и сорбированных газов [10 — 12]. Из отбитого угля за несколько часов истекает основное количество метана, при этом сохраняются остаточные углеводородные газы, обогащенные тяжелыми углеводородами [13 — 15], повышающими степень взрывопожароопасности в угольных шахтах [16, 17]. Основными показателями, отражающими метаноопасность угольных шахт, характеризующую их взрывопожароопасность, являются абсолютная и относительная метанообильность соответственно шахт, выемочных участков, подготовительных выработок.

Относительная метанообильность является достаточно усредненным показателем, так как при больших скоростях подвигания очистного забоя и больших нагрузках на лаву значение относительной метанообильности может занижать

фактическую метаноопасность шахт, что влечет за собой невыполнение требуемого перечня мер борьбы с метаноопасностью и повышение рисков взрывов метана, угольной пыли, пожаров. Показатель абсолютной метанообильности более точно отражает метановую опасность, однако для повышения полноты информативности этого показателя необходимо знать не только количество выделившегося из угля метана, но и то, какие именно газы остались в угле и их количество, то есть количественный и качественный состав остаточных газов угольных пластов.

В нормативно-методических документах по проектированию вентиляции угольных шахт при расчете прогноза относительной метанообильности выемочного участка наряду с основным показателем, таким как природная метаноносность разрабатываемого пласта (x, м^3/т), используется такой показатель, как остаточная метаноносность угля (x_1, м^3/т). Значение относительной газообильности выемочного участка определяется суммой разностей значений x и x_1 с определенными поправочными коэффициентами соответственно для разрабатываемого пласта, пластов-спутников и вмещающих пород. И если показатель x действительно отражает содержание метана в разрабатываемом пласте, то для показателя x_1 не так все очевидно, особенно если рассматривать этот показатель для разных марок углей. Показатель остаточной газоносности используется также для прогноза относительной метанообильности подготовительных выработок.

Таким образом, целью данной статьи является оценка закономерностей распределения остаточных углеводородов по маркам углей разных угольных бассейнов и оценка роли остаточных углеводородов в системе взрывопожароопасности угольных шахт. Также предложена технология нейтрализации взрывчатых свойств остаточных углеводородов угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ.

Теоретические и экспериментальные исследования

Известно, что газ угольных пластов зависит от свойств пластов и состоит в основном из метана (до 90—100%) с примесью диоксида углерода, азота, водорода, гомологов метана, оксида углерода. При разработке угольных пластов в первую очередь выделяется метан, как более подвижный в гомологическом ряду углеводородов, имеющий в структуре своей молекулы наименьшее количество атомов углерода и водорода по сравнению с этаном, пропаном, бутаном и т.д. После истечения из пласта основной массы метана начинают выделяться тяжелые углеводороды. Естественно предположить, что остаточную газоносность угля составляют именно тяжелые углеводороды, особенно, как выяснилось, это характерно для углей марок Ж, КЖ, ОС.

При расчете прогноза относительной газообильности подготовительных выработок делается попытка как-то использовать свойства угля, например, его плотность, и дается прямо пропорциональная зависимость: чем больше плотность угля, тем выше расчетное значение относительной газообильности подготовительной выработки. Но это не всегда так. Установлено, что с уменьшением и увеличением степени преобразования угольной массы содержание остаточных углеводородов в угле снижается, т.е. наблюдается некоторый экстремум наибольшего содержания остаточных углеводородов для марок углей Ж, КЖ.

Было проведено сопоставление содержания и состава остаточных угле-

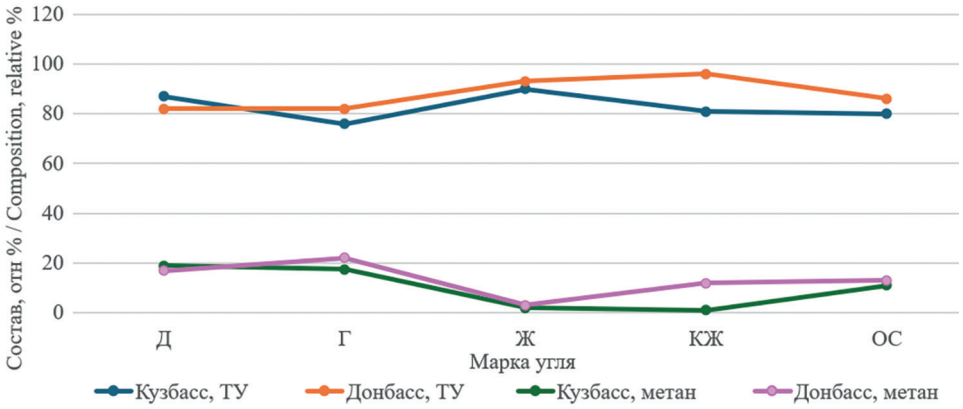

Рис. 1. Содержание метана и тяжелых углеводородов в остаточных газах углей Донбасса и Кузбасса
Fig. 1. Content of methane and heavy hydrocarbons in residual gases of coals of Donbass and Kuzbass

водородов, выделенных из углей одинаковых марок, для двух бассейнов: Кузнецкого (Кузбасс) и Донецкого (Донбасс).

На рис. 1 представлено относительное содержание метана и тяжелых углеводородов в процентах к их сумме в остаточных газах углей Кузбасса и Донбасса. Анализ данных показывает, что, во-первых, для одинаковых марок углей наблюдаются практически одинаковые для обоих бассейнов содержания метана и тяжелых углеводородов в остаточных газах углей по марочному составу. И второй важный вывод: остаточные газы углей более чем на 80% представлены тяжелыми углеводородами во всех марках углей для обоих бассейнов. Таким образом, состав и количественное содержание метана и тяжелых углеводородов по марочному составу углей носит характер закономерности, а именно: остаточные газы углей всех марок на 80% состоят из тяжелых углеводородов.

При сопоставлении содержания остаточных газов Кузбасса и Донбасса вы-

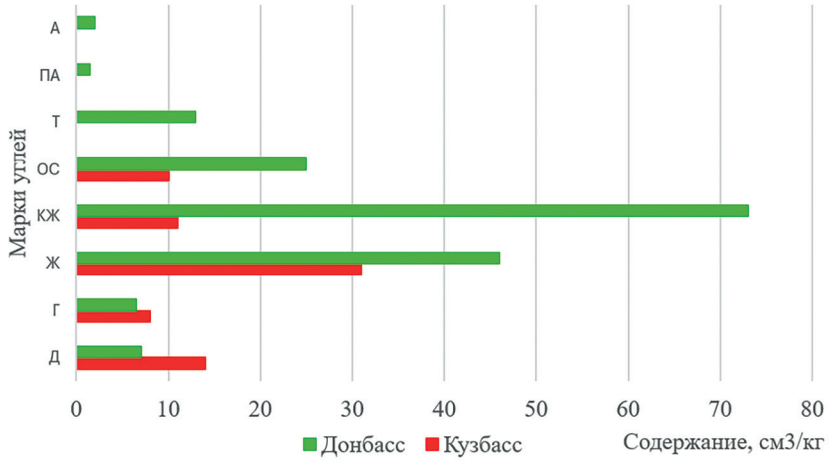

Рис. 2. Содержание остаточных газов в различных марках углей Донбасса и Кузбасса
Fig. 2. Residual gas content in various grades of coal from Donbass and Kuzbass

яснилось, что их содержание в целом больше в углях Донбасса по сравнению с углями Кузбасса, а характер распределения остаточных газов по маркам углей примерно одинаковый. Установлено, что наибольшее содержание остаточных газов углей находится в углях марок Ж, КЖ. С уменьшением и увеличением степени метаморфизма углей содержание в них остаточных газов снижается (рис. 2).

Анализ состава индивидуальных углеводородов к их сумме показывает, что в обоих угольных бассейнах в углях марки Ж количество пропана и бутана превышает содержание остальных газов в 3—7 раз (рис. 3). Возвращаясь к началу статьи и учитывая сделанные выводы по составу и количеству тяжелых углеводородов в остаточных газах углей, необходимо отметить, что расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля приводит к недостоверному (заниженному) значению фактической относительной метанообильности и, следовательно, не отражает фактического состояния взрывоопасности выработок.

Конечно, основным газом, приводящим к возгораниям и взрывам в угольных шахтах, является метан, однако немалую опасность представляют тяжелые углеводороды, содержание которых в остаточных газах пластов составляет до 80%. Опасность тяжелых углеводородов состоит в том, что у них температура воспламенения и концентрационные пределы взрываемости ниже, а теплотворная способность выше, чем у метана. Поэтому тяжелые углеводороды могут явиться «пусковым» фактором в развитии процессов возгораний и взрывов в угольных шахтах.

При добыче угля, его разрушении, измельчении, нагревании вместе с углеводородами выделяются и другие горючие (водород, оксид углерода) и негорючие (азот, диоксид углерода) газы. Поэтому для всесторонней оценки роли тяжелых углеводородов в создании пожароопасных ситуаций необходимо учитывать как горючие, так и негорючие компоненты в остаточных газах уголь-

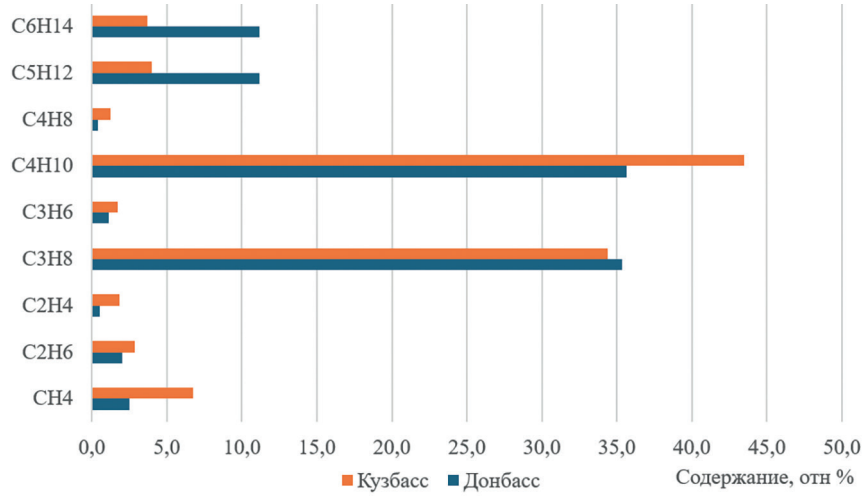

Рис. 3. Состав остаточных газов углей марки Ж
Fig. 3. Composition of residual gases of coals of grade J

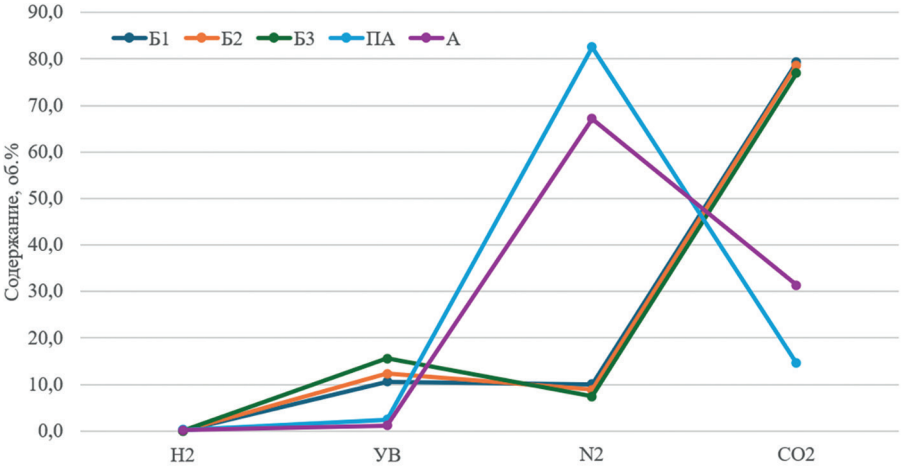

Рис. 4. Соотношение горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей низкой и высокой стадий метаморфизма

Fig. 4. Ratios of combustible and non-combustible components in residual gases of coals of low and high stages of metamorphism

ных пластов. Наличие негорючих компонентов в остаточных газах пластов снижает концентрацию горючих, нейтрализует их взрывчатые свойства и, как следствие, снижает степень их пожароопасности.

В исследованиях, проведенных В.С. Лебедевым и О.В. Скопинцевой [18], были получены данные по содержанию основных неуглеводородных и углеводородных компонентов остаточных газов разных марок углей, выделяющихся при температуре 200 °С. Из горючих компонентов определялось содержание углеводородов (от метана до гексана), кислорода, водорода; из негорючих — содержание азота и диоксида углерода.

Были исследованы угли из буроугольных месторождений Дальнего Востока, угольные пласты пермского возраста Кузнецкого угольного бассейна, каменноугольного возраста Донецкого угольного бассейна. Из бурых углей исследовались три вида углей: Б(1) — Павловский разрез (Приморье); Б(2) — Таврическое месторождение (Приморье); Б(3) — Новиковское месторождение (Сахалин). Из углей средней стадии метаморфизма исследовалось пять видов углей: Д — пл. Сычевский 111 (Кузбасс); Ж(1) — пл. Е-5, ш. «Осинниковская» (Кузбасс); Ж(2) — пл. Е-1, ш. «Осинниковская» (Кузбасс); Ж(3) — пл. К-5, ш. «Осинниковская» (Кузбасс); ОС — пл. 21, ш. «Алардинская» (Кузбасс). Из углей высокой стадии метаморфизма исследовалось два вида углей: ПА — ш. 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс); А — ш. «Алмазная», Гуково Ростовской области (Восточный Донбасс).

По результатам исследований построены графики соотношений горючих и негорючих компонентов в остаточных газах угольных пластов. На рис. 4 показаны соотношения компонентов для углей низкой и высокой стадий метаморфизма (бурых углей и антрацитов). На рис. 5 отражены соотношения горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма.

Из анализа графических данных (см. рис. 4) следует, что для бурых углей содержание углеводородных газов в остаточных газах углей не превышает 15%,

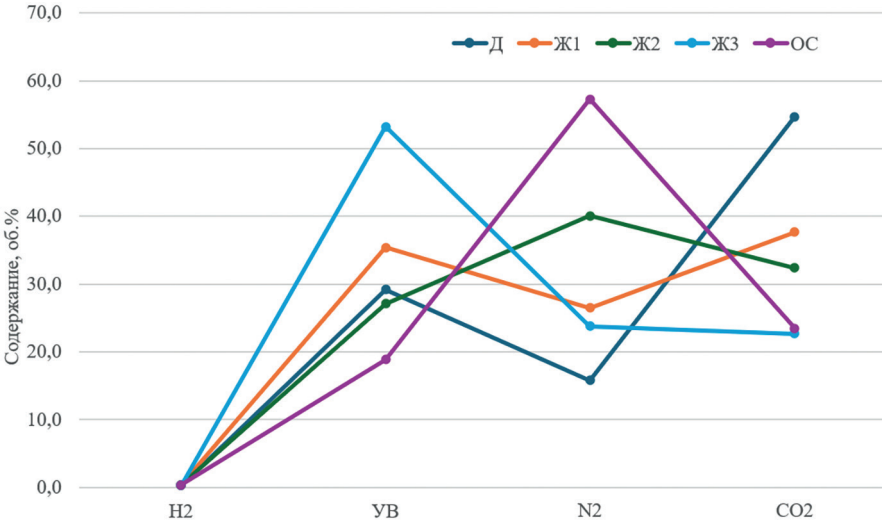

Рис. 5. Соотношение горючих и негорючих компонентов в остаточных газах углей средней стадии метаморфизма

Fig. 5. Ratios of combustible and non-combustible components in residual gases of coals of the middle stage of metamorphism

для антрацитов — 3%. При этом содержание CO_2 в остаточных газах бурых углей очень большое (77—80%); для антрацитов и полуантрацитов содержание углеводородных газов (горючих) не превышает 3%, при этом инертного газа N_2 в остаточных газах содержится от 67 до 82%. Из этого следует, что выделяющиеся при нагревании остаточные газы из бурых углей и антрацитов не представляют серьезной пожароопасности в связи с наличием в них высокого содержания балластных негорючих газов.

Совсем другая картина наблюдается для остаточных газов углей средней стадии метаморфизма. Содержание горючих газов в остаточных газах углей колеблется от 27 до 53%, в то время как содержание балластных газов достигает наименьшего значения (46,5%) для пласта К-5. Вследствие большого содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей марок Д, Ж, ОС температура воспламенения остаточных газов будет определяться парциальным давлением горючих газов и малыми значениями нижних концентрационных пределов взрываемости тяжелых углеводородов.

Для ответа на вопрос: перекрывают ли балластные газы область воспламенения горючих газов, находящихся в остаточных газах углей, были рассчитаны концентрационные пределы взрываемости «чистой» смеси углеводородных газов в остаточных газах исследуемых углей (по формуле Ле Шателье) и концентрационные пределы взрываемости остаточных углеводородных газов с учетом балластных газов, находящихся в угле (таблица).

На рис. 6 по данным таблицы отражены области воспламенения исследуемых марок углей, находящиеся между нижним и верхним пределами взрываемости (левая шкала). По другой шкале, справа, отложена концентрация балластных газов, находящихся в остаточных газах угля. Для бурых углей [Б(1), Б(2), Б(3)] и полуантрацитов и антрацитов [ПА, А] области воспламенения полностью перекрываются балластными газа-

Расчетные пределы взрываемости «чистой» смеси углеводородов (УВ) и остаточных углеводородных газов с балластными газами
Estimated explosion limits of a "pure" mixture of hydrocarbons (HC) and residual hydrocarbon gases with ballast gases

Объект	Марка угля	Расчетные концентрационные пределы взрываемости «чистой» смеси УВ, об%		Содержание балластных газов, об%	Расчетные концентрационные пределы взрываемости остаточных газов с балластными газами, об%	
		нижний	верхний		нижний	верхний
Павловский разрез (Приморье)	Б(1)	2,9	12,7	89,4	22,0	57,8
Тавричанское месторождение (Приморье)	Б(2)	3	13,2	87,6	20,0	55,1
Новиковское месторождение (Сахалин)	Б(3)	3,1	13,5	84,4	17,0	50,0
Пл. Сычевский 111 (Кузбасс)	Д	1,8	9,3	70,5	9,1	37,7
Пл. Е-5, ш. «Осинниковская» (Кузбасс)	Ж(1)	2,1	9,3	64,2	9,8	24,6
Пл. Е-1, ш. «Осинниковская» (Кузбасс)	Ж(2)	2,1	8,7	72,5	13,1	29,8
Пл. К-5, ш. «Осинниковская» (Кузбасс)	Ж(3)	1,8	8,7	46,5	4,1	16,7
Пл. 21, ш. «Алардинская» (Кузбасс)	ОС	1,8	9,2	80,8	18,3	36,6
Шахта 222, Чистяково-Снежнянский район (Донбасс)	ПА	4,2	14,1	97,2	61,0	85,4
Ш. «Алмазная», Гуково Ростовской области (Восточный Донбасс)	А	5	15	98,6	79,0	92,6

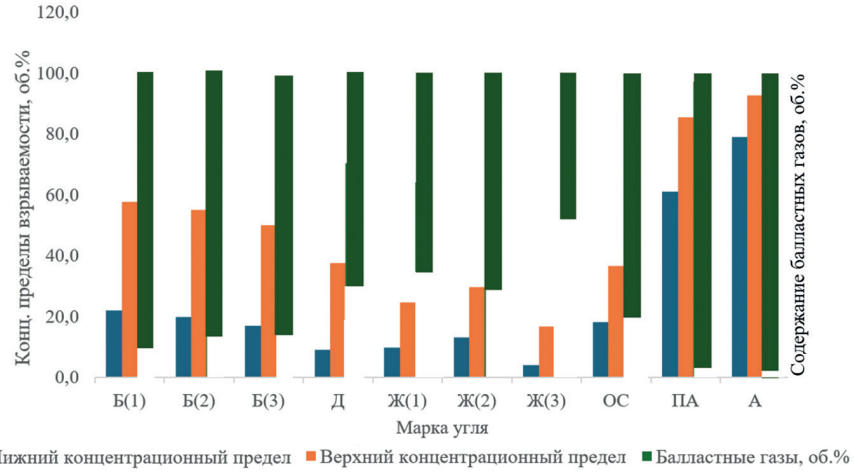

Рис. 6. Расчетные концентрационные пределы взрываемости остаточных углеводородных газов с балластными газами
Fig. 6. Estimated concentration limits of explosiveness of residual hydrocarbon gases with ballast gases

ми. Для угля марки ОС (пласт 21, шахта «Алардинская») область взрываемости не полностью перекрыта балластными газами, поэтому при концентрации углеводородных газов от 18,3 до 19,2% даже при наличии 80,8% балластных газов возможен взрыв смеси. И самая опасная ситуация наблюдается для углей марок Д и Ж, для которых содержание балластных газов не перекрывает область воспламенения углеводородов в реальных остаточных газах углей. Согласно проведенному анализу данных (см. табл. и рис. 6), следует вывод, что для рассматриваемой марки угля (Ж) требуется повышение содержания балластных газов до уровней, перекрывающих расчетные пределы взрываемости реальных остаточных газов.

Для повышения пожаровзрывобезопасности при разработке угольных пластов марки Ж путем увеличения содержания балластных газов в остаточных углеводородных газах угольных пластов предлагается нагнетание в угольный пласт газонаполненного раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ). В качестве газа, флегматизирующего остаточные углеводородные газы, предлагается использовать азот, в качестве ПАВ — смачиватель СП-01. Таким образом, газонаполненный раствор ПАВ представляет собой трехкомпонентную рабочую жидкость, содержащую: воду (в объеме удельного расхода воды от 10 до 30 л/т); растворенный смачиватель СП-01 (с концентрацией от 0,05 до 3%); растворенный азот (с концентрацией от 0,3 до *n*%, *n* определяется из расчета перекрытия пределов взрываемости остаточных углеводородных газов). Полученная рабочая жидкость нагнетается в скважину под давлением от 1,5 МПа до 30 МПа. После насыщения угольного массива в течение времени от 24 до 96 ч массив разрушают, например, рабочим органом комбайна, и орошают водой.

Высокое содержание (более 85%) негорючих балластных газов в остаточных газах углей действует комплексно: разбавляет горючие компоненты ниже их порога воспламенения, поглощает теплоту реакции, препятствуя ее самоподдержанию, и снижает скорость химических реакций горения [19, 20]. Все это приводит к тому, что такая газовая смесь теряет способность к горению и классифицируется как негорючая.

Поверхностно-активные вещества значительно снижают поверхностное натяжение воды. Это позволяет раствору гораздо эффективнее смачивать поверхность угля и проникать глубоко в поры и микротрещины, которые недоступны для чистой воды [21 — 23]. Улучшенное смачивание блокирует доступ кислорода к активным центрам на поверхности угля. Азот в газонаполненных растворах играет двойную роль: во-первых, как ингибитор для перевода горючей смеси в негорючую, во-вторых, как компонент воздушно-механической пены. При разрушении угля высвобождаемый азот взаимодействует со смачивателем, образуя воздушно-механическую пену, которая герметизирует пространство в объеме разрушенной горной массы. Комбинированное действие ПАВ и газовой фазы обеспечивает глубокую и равномерную обеспыливающую обработку угольного массива [24, 25].

Газовые пузырьки, распределенные в растворе (часто в виде пены или эмульсии), создают дополнительное расклинивающее давление и способствуют проникновению активного раствора в самые мелкие пустоты пласта. Использование газовой фазы позволяет уменьшить необходимый объем водного раствора, что снижает затраты и уменьшает обводненность массива. Водная фаза раствора обеспечивает охлаждающий эффект, снижая температуру угольного массива.

Заключение

Исследованиями установлено, что состав и количественное содержание метана и тяжелых углеводородов по марочному составу углей носит характер закономерности, а именно: остаточные газы углей всех марок на 80% состоят из тяжелых углеводородов. Количественное содержание остаточных углеводородов в целом больше в углях Донбасса по сравнению с углями Кузбасса, наибольшее содержание остаточных газов углей находится в углях марок Ж, КЖ. В обоих угольных бассейнах в углях марки Ж количество пропана и бутана превышает содержание остальных газов в 3 — 7 раз.

Расчет относительной метанообильности выемочных участков и подготовительных выработок по разности природной метаноносности разрабатываемого пласта и остаточной метаноносности угля приводит к недостоверному (заниженному) значению фактической относительной метанообильности и чреват недооценкой повышенной потенциальной опасности взрывов тяжелых углеводородов, имеющих более низкую температуру воспламенения и концентрационные пределы взрываемости по сравнению с метаном.

Одним из перспективных направлений по обеспечению взрывопожаробезопасности угольных шахт является обработка угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ. Эффективность технологии флегматизации остаточных газов угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ достигается за счет снижения пылеобразующей способности угля, перевода горючей смеси остаточных газов в негорючую и повышения эффективности пылеулавливания при отбойке угля с помощью воздушно-механической пены. Формирование воздушно-механической пены происходит как в микротрещинах угольного массива, так и на поверхности отбитого угля. Применение газонаполненных растворов обеспечивает равномерную пропитку угольного пласта, одновременно с этим снижается прочность массива.

Обработка угольных пластов газонаполненными растворами ПАВ является перспективной и эффективной технологией для предупреждения взрывопожароопасных ситуаций в шахтах. Сочетание улучшенного смачивания, инертизации порового пространства и охлаждающего эффекта позволяет комплексно воздействовать на основные факторы, инициирующие процессы воспламенения углеводородных газов. Внедрение этой технологии должно рассматриваться как важный элемент комплексной системы противоаварийной защиты в угольных шахтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *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.

3. *Jia Z., Ye Q., Xiong W., Liu J.* Damage effect and injury range of shock waves in mine methane explosion // Methane. 2024, vol. 3, no. 4, pp. 584 — 594. DOI: 10.3390/methane3040033.

4. *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.

5. *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.

6. *Pleshko M., Kulikova E., Nasonov A.* Assessment of the technical condition of deep mine shafts // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 239, article 01021. DOI: 10.1051/matecconf/201823901021.

7. *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.

8. *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.

9. *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_4/coal dust coexistence explosions // Processes. 2025, vol. 13, no. 3, article 858. DOI: 10.3390/pr13030858.

10. *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.

11. *Sizin P., Zakorshmennyi I., Blokhin D., Kobylkin A., Dianov P.* Spatiotemporal distribution of methane concentration from broken coal mass // EPJ Web of Conferences. 2025, vol. 321, article 01014. DOI: 10.1051/epjconf/202532101014.

12. *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.

13. *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.

14. *Brigida V. S., Golik V. I., Dzeranov B. V.* Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks // Mining. 2022, vol. 2, pp. 809—821. DOI: 10.3390/mining2040045.

15. *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.

16. *Liang Y., Shi B., Yue J., Zhang Ch., Shen X., Hu T., Han Q.* Desorption characteristics of CH_4–C_2H_6 mixed gas in heavy hydrocarbon-rich coal seams // ACS Omega. 2024, vol. 9, no. 14, pp. 16176—16186. DOI: 10.1021/acsomega.3c10156.

17. *Босиков И. И., Клюев Р. В., Майер А. В., Стась Г. В.* Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 97—106. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.

18. *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.

19. *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.

20. *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.

21. *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.

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

23. *Пернебек Б. П., Рыбичев А. А., Федоткин И. О., Оразхан А. А.*, Мадмарова А. Исследование критической концентрации мицеллообразования при смачивании пыли бурых углей // Уголь. — 2025. — № 3. — С. 27—32. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-27-32.

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

25. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. 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.

2. 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.

3. Jia Z., Ye Q., Xiong W., Liu J. Damage effect and injury range of shock waves in mine methane explosion. *Methane*. 2024, vol. 3, no. 4, pp. 584—594. DOI: 10.3390/methane3040033.

4. 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.

5. 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.

6. Pleshko M., Kulikova E., Nasonov A. Assessment of the technical condition of deep mine shafts. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 239, article 01021. DOI: 10.1051/matecconf/201823901021.

7. 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.

8. 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.

9. 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_4/coal dust coexistence explosions. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 3, article 858. DOI: 10.3390/pr13030858.

10. 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.

11. Sizin P., Zakorshmennyi I., Blokhin D., Kobylkin A., Dianov P. Spatiotemporal distribution of methane concentration from broken coal mass. *EPJ Web of Conferences*. 2025, vol. 321, article 01014. DOI: 10.1051/epjconf/202532101014.

12. 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.

13. 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.

14. Brigida V. S., Golik V. I., Dzeranov B. V. Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks. *Mining*. 2022, vol. 2, pp. 809—821. DOI: 10.3390/mining2040045.

15. 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.

16. Liang Y., Shi B., Yue J., Zhang Ch., Shen X., Hu T., Han Q. Desorption characteristics of CH_4–C_2H_6 mixed gas in heavy hydrocarbon-rich coal seams. *ACS Omega*. 2024, vol. 9, no. 14, pp. 16176—16186. DOI: 10.1021/acsomega.3c10156.

17. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Mayer A. V., Stas G. V. Development of a method for analyzing and evaluating the optimal state of aerogasodynamic processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 97—106. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

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

23. Pernebek B. P., Rybichev A. A., Fedotkin I. O., Orazkhan A. A., Madmarova A. research of the critical concentration of micelle formation when wetting brown coal dust. *Ugol'*. 2025, no. 3, pp. 27—32. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-3-27-32.

24. 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].

25. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скопинцева Ольга Васильевна[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: skopintseva54@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,
Рыбичев Алексей Алексеевич[1] — аспирант,
ассистент, e-mail: rybichev@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0005-9269-201X,
Баловцев Сергей Владимирович[1] — д-р техн. наук,
доцент, e-mail: balovcev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,
[1] Университет науки и технологий МИСИС.
Для контактов: Рыбичев А.А., e-mail: rybichev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

O.V. Skopintseva[1], Dr. Sci. (Eng.),
Professor, e-mail: skopintseva54@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7257-8720,
A.A. Rybichev[1], Graduate Student,
Assistant, e-mail: rybichev@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0005-9269-201X,
S.V. Balovtsev[1], Dr. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: balovcev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0961-6050,
[1] University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.A. Rybichev, e-mail: rybichev@yandex.ru.

Получена редакцией 11.08.2025; получена после рецензии 15.09.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 11.08.2025; received after the review 15.09.2025; accepted for printing 10.10.2025.