

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 622.8:66.081:666.7.003

**ОСТАТОЧНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ КАК ФАКТОР
ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

В.С. ЛЕБЕДЕВ¹, О.В. СКОПИНЦЕВА²

*¹Российский государственный геологоразведочный университет
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая 23; e-mail: vslebed@yandex.ru*

*²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт
119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 6; e-mail: skopintseva54@mail.ru*

Исследованы остаточные углеводороды угольной пыли и углей шахты «Осинниковская» (Кузбасс), выделяющиеся из пыли и угля (и их фракций по размеру) при термическом воздействии (температуры 150—250 °С). Установлено присутствие остаточных углеводородов в угольной пыли и существенное обогащение их тяжелыми углеводородами. Показано, что угольная пыль наследует остаточные углеводороды углей, из которых она формируется. Присутствие в угольной пыли остаточных углеводородов, обогащённых тяжелыми углеводородами, создает потенциальную опасность развития пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

Ключевые слова: остаточные углеводороды углей; остаточные углеводороды в угольной пыли; тяжелые углеводороды в угольных пластах; пожаровзрывоопасность в угольных шахтах.

**COAL DUST RESIDUAL HYDROCARBONS AS A FACTOR OF FIRE
AND EXPLOSION RISKS INCREASING IN COAL MINES**

V.S. LEBEDEV¹, O.V. SKOPINTSEVA²

*¹Russian State Geological Prospecting University
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklay's street, 23; e-mail: vslebed@yandex.ru*

*²National University of Science and Technology MISiS, Mining Institute
119991, Russia, Moscow, Leninsky Prospekt, 6; e-mail: skopintseva54@mail.ru*

The residual hydrocarbons of coal dust and coals of Osinnikovskaya mine (Kuzbass) which are allocated from the dust and coal, as well as their fractions by the size, are investigated at thermal influence (under the temperatures of 150—250 °C). The presence of residual hydrocarbons at coal dust and their essential enrichment by the heavy hydrocarbons is established. The coal dust is shown to inherit residual hydrocarbons from the coals which formed it. Presence of the residual hydrocarbons at the coal dust, enriched with heavy hydrocarbons, creates a potential danger of fire and explosions in coal mines.

Keywords: residual hydrocarbons of coals; residual hydrocarbons in coal dust; heavy hydrocarbons in coal layers; fire and explosion danger in coal mines.

Проблема пожаровзрывоопасности (ПВО) в угольных шахтах является общемировой и требует решения. Высокие концентрации метана в угольных пластах являются факторами создания пожа-

ровзрывоопасных (ПВО) ситуаций на всех этапах освоения угольных месторождений. Необходимо отметить, что повышенные содержания тяжёлых углеводородов (ТУ) в углях еще больше увеличивает

ПВО [7, 10]. В [1, 2, 5, 6] отмечается, что при эксплуатации подземных угольных месторождений ПВО в основном связана с взрывами метановоздушных и пылеметановоздушных смесей, а присутствие ТУ повышает ПВО. Схему развития процесса возгорания и взрыва метановоздушных и пылеметановоздушных смесей, по работам [1, 2, 5, 6], можно представить в виде:

- 1) возгорание метана;
- 2) разогрев угольной пыли и выделение летучих веществ;
- 3) горение летучих веществ;
- 4) горение углистого вещества пыли.

Весь этот комплекс процессов и приводит к возникновению ПВО ситуаций в угольных шахтах.

Авторами приведены результаты исследования содержания и состава остаточных углеводородов (ОУВ) угольной пыли и углей, из которых формируется угольная пыль. Показано, что присутствие в угольной пыли ОУВ, обогащённых тяжёлыми углеводородами, создаёт потенциальную опасность возникновения ПВО ситуаций в угольных шахтах.

При вскрытии угольных пластов и снижении давления происходит последовательное выделение углеводородов (УВ) из углей в соответствии с их сорбционными свойствами. Метан, как наиболее подвижный компонент, опережает более тяжёлые углеводороды, которые могут выделяться только после истечения из пласта основной доли метана. В итоге в угле остаются наиболее трудно выделяемые УВ, которые сохраняются в нём длительное время и извлекаются лишь при интенсивном (тепловом, механическом, вакуумном) воздействии на уголь [8, 9].

При исследовании образцов угля Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасс) методом термической дегазации [3, 4] установлено, что ОУВ в основном состоят из ТУ (пропана, бутана и др.). Данные о присутствии ОУВ в угольной пыли отсутствовали. Однако угольная пыль, как отмечалась выше, оказывает важнейшее влияние на ПВО в шахтах. Можно предположить, что угольная пыль будет содержать ОУВ, обогащённые ТУ, так как формирование угольной пыли происходит в результате дробления, размельчения и истирания углей в процессе добычи угля и в других процессах, протекающих в шахтном пространстве. При нагревании угольной пыли ОУВ могут выделяться в шахтное пространство и повышать ПВО в угольных шахтах. В связи с отмеченным было проведено исследование ОУВ угольной пыли и сопоставлено с ОУВ углей, за счёт которых формируется угольная пыль.

Методика исследований

Для выделения ОУВ и определения их состава был использован метод термической дегазации — нагревание при температуре 150—250 °С в атмосфере

инертного газа и установление содержания и состава выделившихся УВ. Исползованный вариант термической дегазации позволяет практически полностью извлекать из исследуемых проб ОУВ и определять их состав до протекания интенсивных процессов пиролиза органических компонентов [3].

Исследуемая воздушносухая проба угольной пыли или угля (или их фракций по размеру) помещалась в реакционную трубку и продувалась инертным газом (аргоном или гелием) для удаления воздуха. Затем трубка герметизировалась и нагревалась до требуемой температуры (150—250 °С). При нагревании из исследуемой пробы выделялись компоненты в пространство трубки. После прогревания трубка соединялась с потоком газа-носителя, выделившиеся компоненты направлялись в хроматографическую колонку газового хроматографа («Кристалл-5000.1» или «М-3700») и определялось содержание предельных и непредельных УВ от CH_4 до C_6H_{14} . Для определения УВ использовалась хроматографическая металлическая колонка с внутренним диаметром 2—3 мм и длиной 3 м, сорбент — модифицированный Al_2O_3 . Анализ проводился при программировании температуры. Результаты анализов приводятся в объёмных процентах (об. %) и в $\text{см}^3/\text{кг}$, погрешность — ± 3 отн. %. Состав УВ приводится в относительных процентах в сумме УВ от CH_4 до C_6H_{14} , в том числе предельных и непредельных углеводородов (отн. %).

Объекты и результаты исследований

Объектом исследования являлась осевшая угольная пыль в вентиляционном штреке пласта Е-5 шахты «Осинниковская» Кузбасса. В ней производится добыча угля средних стадий метаморфизма. Шахта вскрывает угольные пласты (сверху вниз) Е-6 (марка Ж), Е-5 (Ж), Е-1 (Ж), К-5 (Ж), К-1 (КЖ).

Проведённое исследование ОУВ углей угольных пластов шахты «Осинниковская» [3, 4] показало, что угли содержат повышенные количества ОУВ (до 44 $\text{см}^3/\text{кг}$), которые существенно обогащены ТУ. Полагаем, что ОУВ угольной пыли, образующейся при добыче этих углей, будут обогащены ТУ.

Исследовалась вся масса исходной пыли и отдельные фракции пыли: 0,25—0,5, 0,1—0,25, 0,07—0,1 и менее 0,07 мм. Фракции были выделены из исходной пыли в результате ситового анализа. Для сопоставления ОУВ угольной пыли и углей, из которых формируется угольная пыль, исследовались ОУВ отдельных фракций углей из разреза шахты (угли пластов Е-6, Е-5 и К-5). Фракции из углей получены дроблением и измельчением угля с последующим ситовым анализом.

Угольная пыль. Установлено присутствие ОУВ в исходной угольной пыли. Количество ОУВ, суммарное количество УВ, выделившихся в интервале температур от 150 до 250 °С, варьировало от 25 до 41 см³/кг. Состав ОУВ исследованных проб пыли представлен в табл. 1 и 2.

На рис. 1 представлена зависимость «выхода» ОУВ от температуры для всей массы исходной угольной пыли и фракций пыли. Наблюдается общая закономерность для всех исследованных проб: с ростом температуры увеличивается количество выделяемых УВ. При температуре 150 °С содержание ОУВ во всех исследованных пробах варьирует от 3 до 7 см³/кг. При температуре 250 °С различие суммы выделяемых УВ более значительно — от 12 до 25 см³/кг, причем наименьшее количество выделяется из всей массы пыли, а наибольшее из

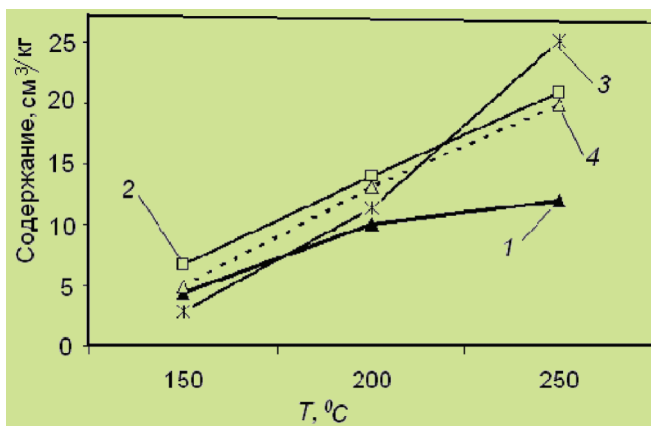


Рис. 1. Зависимость «выхода» ОУВ из нефракционированной массы и фракций угольной пыли от температуры: 1 — нефракционированная пыль; 2–4 — фракции: 2 — 0,25–0,5; 3 — 0,1–0,25; 4 — 0,07–0,1 мм

Таблица 1

Характеристика ОУВ угольной пыли и углей шахты «Осинниковская»

Проба	Фракция, мм	Температура, °С	Состав углеводородов, отн. %								
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄
Угольная пыль	Вся масса пыли	150	24,0	4,0	1,5	13,0	0,0	39,0	0,0	12,0	6,5
		200	19,4	4,0	2,2	15,5	1,0	40,0	0,3	9,8	7,7
		250	21,4	4,3	4,5	16,1	2,2	32,4	1,3	9,6	8,3
	0,25–0,5	150	13,4	1,6	1,3	19,4	1,8	38,5	0,0	13,4	10,4
		200	14,8	3,1	1,9	29,6	1,7	30,4	0,0	9,3	9,2
		250	15,7	3,6	3,5	25,9	0,6	29,3	0,6	10,4	10,4
	0,1–0,25	150	9,8	1,4	0,7	9,1	0,0	44,1	0,2	18,9	15,8
		200	11,4	2,0	1,1	16,9	0,0	47,4	0,4	11,5	9,2
		250	14,7	3,1	3,3	15,5	1,5	37,3	0,7	12,2	11,6
	0,07–0,1	150	15,1	2,1	1,2	9,5	0,0	46,0	0,0	15,5	10,7
		200	13,1	2,5	1,7	15,2	0,9	38,0	0,0	14,7	13,9
		250	15,6	3,2	3,6	10,5	1,8	34,0	0,6	13,2	17,5
То же	<0,07	200	6,7	0,0	0,0	3,5	0,3	60,0	0,5	20,0	9,0
Уголь пласта Е-5	0,25–0,5	200	6,5	2,6	1,2	40,0	2,0	41,0	1,0	4,5	1,1
	0,07–0,1	200	6,5	2	1,7	26,5	1,1	45	1	11,7	4,5
	<0,07	5,9	1,5	0,8	21,9	1,7	47,5	1,5	15,2	4	5,9
Уголь пласта Е-6	0,25–0,5	200	6,7	2,6	1,1	40,1	2,2	41,5	0	4,7	1,1
	<0,07	200	5,9	1,5	0,8	21,9	1,7	47,5	1,5	15,2	4
Уголь пласта К-5	0,25–0,5	200	8,8	2,5	1,6	20,4	0,7	42,2	0,5	16,2	7,2
	<0,07	200	7,1	1,8	1,8	14,0	1,1	44,1	0,4	19,2	10,7

Таблица 2

Обобщенная характеристика ОУВ угольной пыли и углей шахты «Осинниковская»

Проба	Фракция, мм	Долевое содержание, отн. %			
		Метан	Пропан	Бутан	C ₃ H ₆ -C ₆ H ₁₄
Пыль	0,25–0,5	14,8	29,6	30,4	80,2
	0,1–0,25	11,4	16,9	47,4	85,6
	0,07–0,1	13,1	15,2	38	82,8
	<0,07	6,7	3,5	60	93,3
Уголь Е-5	0,25–0,5	6,5	40	41	89,7
	<0,07	6,5	26,5	47,5	89,8
Уголь Е-6	0,25–0,5	5,9	40,1	41,5	89,6
	<0,07	5,7	21,9	47,5	91,8
Уголь К-5	0,25–0,5	8,8	20,4	42,2	87,2
	<0,07	7,1	14	44,1	89,4

фракции 0,1—0,25 мм. Следует отметить, что «выход» ОУВ при 250 °С для отдельных фракций пыли составляет от 18 до 25 см³/кг.

На рис. 2 представлен состав ОУВ отдельных фракций угольной пыли, выделяющихся при температуре 200 °С. В целом наблюдается схожая картина распределения индивидуальных УВ во всех исследованных фракциях пыли. ОУВ всех фракций пыли обогащены ТУ: доля суммы C_3H_8 — C_6H_{14} , в том числе предельных и непредельных углеводородов, варьирует от 80,2 до 85,4 отн. %. Необходимо отметить различия в долях пропана и бутана в от-

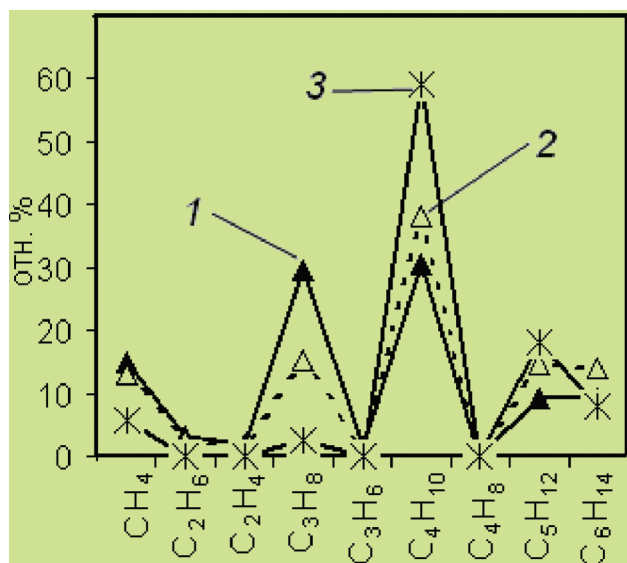


Рис. 2. Состав ОУВ отдельных фракций угольной пыли (Т 200 °С) фракция: 1 — 0,25—0,5 мм; 2 — 0,07—0,1 мм; 3 — < 0,07 мм

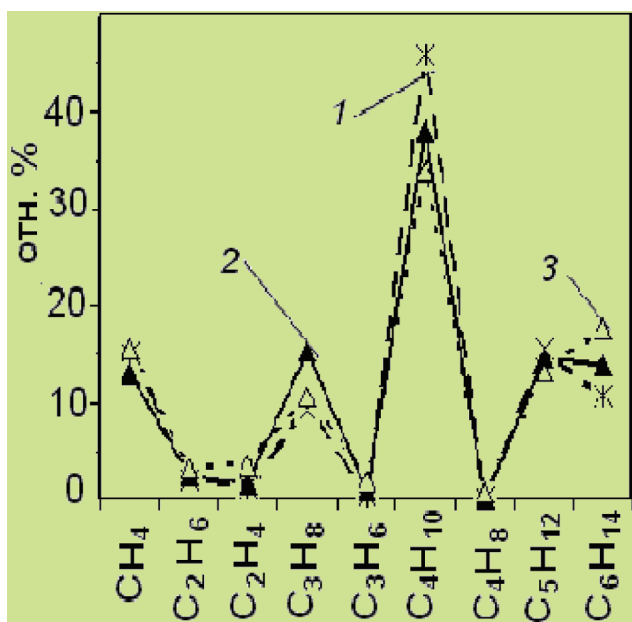


Рис. 3. Состав ОУВ фракции 0,07—0,1 мм угольной пыли при Т: 1 — 150; 2 — 200; 3 — 250 °С

дельных фракциях угольной пыли. Максимальная доля пропана установлена во фракции 0,25—0,5 мм (29,6 отн. %) и минимальная — во фракции менее 0,07 мм (всего 3,5 отн. %). Для бутана картина обратная. Максимальная доля бутана установлена во фракции менее 0,07 мм (60 отн. %), а минимальная — во фракции 0,25—0,5 мм (30,4 отн. %). Такие различия можно объяснить размерами угольных частиц фракций. «Тонкие» минимальные по размерам фракции угольной пыли «потеряли» большее количество УВ C_3H_8 — C_6H_{14} , в том числе предельных и непредельных углеводородов, что отразилось в относительном обогащении оставшихся УВ более тяжёлыми компонентами. Этим можно объяснить различия в долях пропана и бутана во фракциях 0,25—0,5 и менее 0,07 мм. Этими же факторами можно объяснить увеличение доли суммы C_3H_8 — C_6H_{14} с уменьшением размера фракций: во фракциях 0,25—0,5 содержится до 80,2 отн. %, во фракциях менее 0,07 мм — 93,3 отн. %.

Принципиальное значение представляет изучение ОУВ «тонких» фракций пыли (100 мкм и менее), которые преобладают в угольной пыли шахт. На рис. 3 представлен состав ОУВ фракции 0,07—0,1 мм угольной пыли, выделяющейся при температурах 150, 200 и 250 °С. Состав ОУВ фракции пыли 0,07—0,1 мм при всех температурах аналогичный, но установлены небольшие различия в долях пропана и бутана. Максимальная доля пропана (15 отн.%) установлена при температуре 200 °С, а максимальная доля бутана (46 отн. %) — при 150 °С. Главное, что при всех температурах ОУВ существенно обогащены ТУ — доля суммы C_3H_8 — C_6H_{14} , в том числе предельных и непредельных углеводородов, варьирует от 77,6 до 82,6 отн. %.

Подводя итоги исследования ОУВ угольной пыли следует отметить основное — угольная пыль содержит значительные количества ОУВ и существенную их обогащенность ТУ C_3H_8 — C_6H_{14} , в том числе предельными и непредельными углеводородами, (до 93 отн. % во фракции менее 0,07 мм). Необходимо отметить, что ОУВ из угольной пыли и её фракций выделяются уже при 150 °С.

Сопоставление ОУВ угольной пыли и углей

Образование угольной пыли в шахтном пространстве происходит при разработке угольных пластов (дробление, истирание) и других процессах в шахтном пространстве. Для понимания формирования ОУВ угольной пыли важно было исследовать ОУВ различных фракций углей, из которых формируется угольная пыль. Проведено исследование ОУВ отдельных фракций угля из пласта Е-5 (температура 250 °С) и установлено практически одинаковое содержание ОУВ (с незначительным снижением по мере уменьшения размеров фрак-

ций угля пласта Е-5 (погрешность определений ± 3 отн. %):

0,25–0,5 мм: 41; 0,1–0,25 мм: 37; 0,07–0,1 мм: 34 см³/кг.

На рис. 4 представлен состав ОУВ отдельных фракций угля пласта Е-5 (температура 200 °С). В целом состав ОУВ во всех исследованных фракциях близок, но установлены некоторые различия. Относительное содержание пропана наибольшее во фракции 0,25–0,5 мм (40 отн. %) и наименьшее во фракции менее 0,07 мм (26,5 отн. %). Доли бутана в исследованных фракциях аналогичные, но во фракции менее 0,07 мм доля бутана несколько больше, чем в более крупных фракциях (табл. 2). Необходимо отметить, что подобная картина установлена и для фракций угольной пыли (рис. 2). Как отмечалось выше, такие различия можно объ-

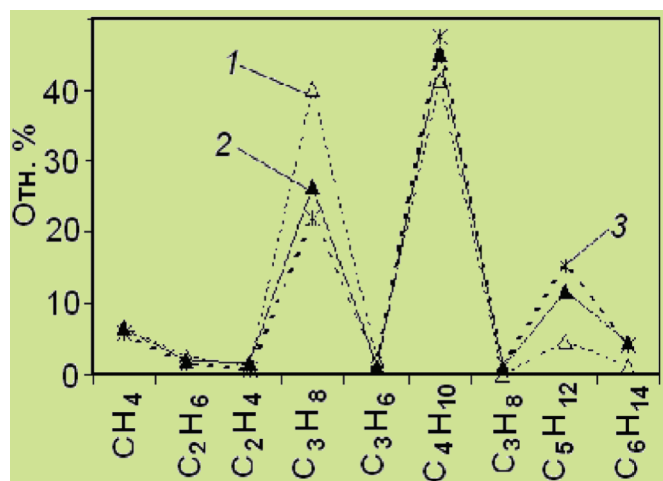


Рис. 4. Состав ОУВ отдельных фракций угля пласта Е-5 при T 200 °С: 1 – 0,25–0,5; 2 – 0,1–0,25; 3 – < 0,07 мм

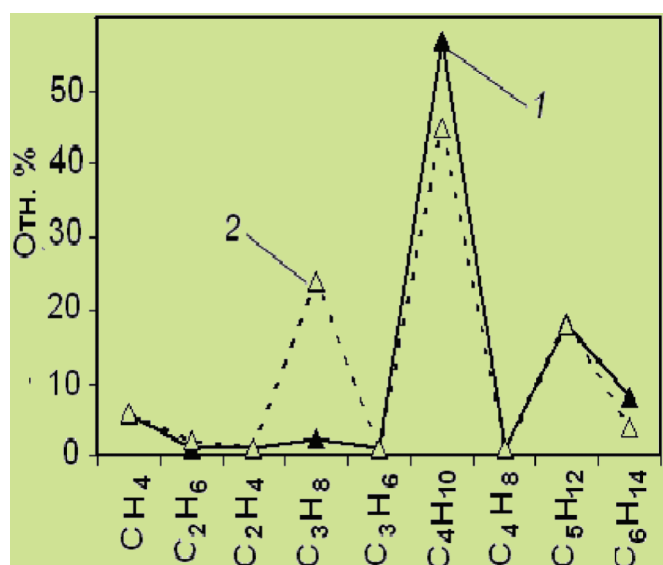


Рис. 5. Сопоставление состава ОУВ фракции < 0,07 мм угольной пыли и угля пласта Е-5 при T 200 °С: 1 – угольная пыль; 2 – уголь Е-5

яснить большей «утечкой» легких компонентов из мелких частиц угля, что и приводит к некоторой потере пропана и относительному повышению доли бутана в «тонких» фракциях.

Результаты исследования ОУВ фракций угля пласта Е-5 позволяют предположить, что в процессе измельчения угля основное количество ОУВ не «утекает» из угля, т. е. уходят незначительные количества в основном легких компонентов ОУВ.

На рис. 5 представлен состав ОУВ наиболее «тонкой» фракции (менее 0,07 мм, температура 200 °С) угольной пыли и угля пласта Е-5. Наибольшие различия установлены для пропана. Максимальная доля пропана в ОУВ (21,9 отн. %) во фракции угля и существенно меньше — во фракции угольной пыли (3,5 отн. %). Картина для бутана противоположная — максимальная доля бутана установлена во фракции угольной пыли (60 отн. %) и меньше — во фракции угля (45 отн. %). В целом это отразилось в долях суммы $C_3H_8-C_6H_{14}$ в ОУВ фракций пыли и угля: во фракции угольной пыли — 93, а во фракции угля — 89,8 отн. %.

В табл. 2 приведена обобщенная характеристика ОУВ отдельных фракций угольной пыли и углей из некоторых угольных пластов шахты «Осинниковская». Отметим главное: ОУВ угольной пыли и углей существенно обогащены ТУ. В результате проведенных исследований можно полагать, что угольная пыль наследует ОУВ углей, из которых она формируется. Следует отметить, что в «тонких» фракциях ОУВ угольной пыли несколько больше доля ТУ, чем в «тонких» фракциях углей. Полагаем, что в процессе формирования угольной пыли улетучиваются легкие компоненты, что повышает долю ТУ в ОУВ угольной пыли.

Роль ОУВ угольной пыли в создании ПВО в угольных шахтах

О роли ОУВ углей в создании ПВО ситуаций в угольных шахтах отмечалось в [3, 4], но о роли ОУВ угольной пыли в создании ПВО ситуаций данные отсутствуют, нет и данных о наличии ОУВ в угольной пыли. Полагаем, что установленное присутствие в угольной пыли ОУВ, обогащенных ТУ, повышает потенциальную ПВО в угольных шахтах.

Потенциальная опасность ОУВ угольной пыли и ОУВ углей, обогащенных ТУ, определяется следующим.

Известно, что температура воспламенения и концентрационные пределы взрываемости ТУ меньше, а теплотворная способность больше, чем у метана [3]. Именно в этом и таится потенциальная опасность ОУВ, так как тепловое воздействие на уголь происходит во многих процессах отделения угля от массива и способствует выделению ОУВ в шахтную атмосферу не только из углей, но из угольной пыли. Полученные данные о содержании

и составе ОУВ угольной пыли позволяют предположить, что ОУВ пыли могут приводить к созданию ПВО ситуаций в угольных шахтах. Повышенные концентрации ТУ в ОУВ, выделяющихся из угольной пыли, могут привести к снижению температуры воспламенения пылегазовоздушных смесей.

Учитывая результаты выполненных исследований ОУВ угольной пыли и данные по ОУВ углей из [3, 4], можно предположить следующую последовательность развития ПВО процессов в угольных шахтах:

- 1) выделение ОУВ из углей и формирование угольной пыли в процессе добычи угля;
- 2) воспламенение ОУВ, выделившихся из угля, и нагревание угольной пыли;
- 3) выделение ОУВ из угольной пыли, их воспламенение и нагрев пыли до температуры протекания процессов пиролиза угольного вещества пыли;

- 4) пиролиз угольного вещества пыли с выделением горючих веществ;
- 5) воспламенение выделившихся горючих веществ и разогрев твердого угольного вещества пыли;
- 6) выгорание углеродных частиц пыли.

Вся предполагаемая последовательность процессов и приводит к возникновению ПВО ситуаций в угольных шахтах.

В заключение следует отметить следующее.

Установлено присутствие ОУВ в угольной пыли и существенное обогащение их ТУ. ОУВ угольной пыли в целом наследуют ОУВ углей, из которых формируется угольная пыль. Существенная обогащённость ОУВ угольной пыли и углей ТУ и их выделение в шахтную атмосферу может привести к снижению температуры воспламенения пылегазовоздушной смеси. Это и представляет потенциальную опасность возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах /М.И. Нецепляев, А.И. Любимова, П.М. Петрухин и др. М.: Недра, 1992. 298 с.
2. Забурдяев Г.С. О предупреждении взрывов метано-и пылевоздушных смесей в угольных шахтах // Уголь. 2003. № 10. С. 36–41.
3. Лебедев В.С., Иванов Д.В., Скопинцева О.В., Савельев Д.И. Оценка роли глубокосорбированных углеводородов угольных пластов в возникновении пожароопасных ситуаций в угольных шахтах // Изв. вузов. Геология и разведка. 2010. №2. С.86–88.
4. Лебедев В.С., Скопинцева О.В., Савельев Д.И. Глубокосорбированные углеводороды в каменных углях Кузнецкого бассейна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №5. С. 244–250.
5. Мамаев В.И., Ибраев Ж.А., Лигай В.А. и др. Предупреждение взрывов пылеметано-воздушных смесей. М.: Недра, 1990. 159 с.
6. Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Горный журнал. 2014. № 5. С. 12–16.
7. Рогозина Е.А. Состав, зональность и масштабы генерации газов при катагенезе органического вещества гумусовых углей // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. № 3. С. 20–38.
8. Розанцев Е.С., Таран Н.П. Исследование состава углеводородных газов пластов Кузбасса с целью возможности прогнозирования их выбросоопасности // Повышение безопасности труда при добыче угля. М.: Изд-во «Мир горной книги», 1990. С. 88–95.
9. Старобинец И.С., Федорова Г.С., Тихомирова Е.С. Экранирующая и проводящая роль угленосных отложений при миграции углеводородных газов // Геология нефти и газа. 1983. № 7. С. 25–31.
10. Трофимов Л.А. О тяжелых углеводородах в угольных газах Восточной части Донбасса // Геологическое строение Ростовской обл. и сопредельных территорий. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1972. С. 72–77.