

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 544.45

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО АЭРОЗОЛЯ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ НА ПРЕДЕЛ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

© 2021 г. С. В. Валиулин^{1*}, А. А. Онищук¹, Д. Ю. Палеев²,
В. В. Замашиков¹, А. А. Коржавин¹, В. М. Фомин³

¹Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

³Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: valiulin@kinetics.nsc.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020;
после доработки 01.10.2020;
принята в печать 20.10.2020

Показано, что при механическом воздействии на уголь наряду с эмиссией газообразных горючих соединений происходит выделение высокомолекулярных углеводородов, что, в свою очередь, приводит к образованию органического аэрозоля. Определен нижний предел воспламенения метановоздушной смеси с органическим аэрозолем. Концентрации метана и аэрозоля варьировались в пределах 0–50 г/м³ и 0–6.5 мольн.% соответственно. Полученные зависимости нижнего предела воспламенения от концентраций горючих компонентов могут оказаться полезными в вопросах улучшения взрывобезопасности в угольных шахтах.

Ключевые слова: угольный наноаэрозоль, горение метановоздушной смеси, образование аэрозолей, взрывы в угольных шахтах.

DOI: 10.31857/S0207401X21040130

ВВЕДЕНИЕ

Вклад Н.Н. Семёнова в теорию горения связан с развитием теорий цепного [1] и теплового взрывов [2, 3]. Создание Н.Н. Семёновым теории цепных разветвленных реакций дало толчок к поиску различных химических систем, описываемых в рамках этой теории. Было необходимо установить носителей цепей, элементарные стадии зарождения, продолжения, разветвления и обрыва цепей. Цели этих исследований — объяснить протекание различных процессов и найти пути управления ими. Одной из сфер человеческой деятельности, в которых чрезвычайно важно понимание механизма цепного воспламенения, является добыча угля, связанная с проблемой взрывов в угольных шахтах.

В России сосредоточено более трети общемировых запасов угля, и в связи с этим Россия стала одним из мировых лидеров по производству угля. Уголь играет большую роль в энергобалансе страны, составляя более четверти в балансе топливно-энергетического комплекса. Однако взрывы в угольных шахтах регулярно происходят во всех странах с интенсивной угледобычей. Взрывы метановоздушных смесей в шахтах представляют собой

динамическое явление с большой разрушительной силой. Особенно опасны взрывы с участием взвешенных аэрозольных частиц, образованных при дроблении угля [4]. Несмотря на принятые многочисленные меры, взрывоопасность в угольных шахтах до сих пор не устранена. Одна из причин заключается в появлении новых высокопроизводительных средств добычи угля, приводящих к росту запыленности и, как следствие, к повышению опасности взрыва. Только в XX веке в мире произошло более пятисот крупных катастроф в угольных шахтах, что привело к гибели около 10000 горняков [5]. Двадцать первый век не принес заметных улучшений в безопасности на угольном производстве. Наиболее серьезные аварии за последние годы произошли в России на шахтах “Тайжина” (2004 г.), “Есаульская” (2005 г.), “Томская” (2006 г.), “Юбилейная” (2007), “Ульяновская” (2007 г.), “Комсомольская” (2007 г.), “Распадская” (2010 г.), “Суходольская-Восточная” (2011 г.), “Воркутинская” (2013 г.), “Северная” ОАО “Воркутауголь” (2016 г.). Произошедшие аварии указывают на недостаточную изученность причин, вызывающих такие катастрофы.

Взрывы в угольных шахтах начинаются с воспламенения горючих газов. Чаще всего воспламенение происходит непосредственно у поверхности забоя в результате фрикционного нагрева при воздействии резцов шнека очистного комбайна на угольный пласт. Локальные концентрации метана и других горючих компонентов, выделяющихся с поверхности при разрушении забоя резцами, могут оказаться достаточными для воспламенения, а локальная температура фрикционного нагрева может достигать 1000 К [6–8]. В результате у поверхности угольного пласта могут образовываться языки пламени размером от нескольких десятков сантиметров до метра. Эти языки пламени могут возникать и исчезать, но существует опасность поднятия угольной пыли и образования пылевоздушной смеси, приводящей к распространению более мощной вторичной взрывной волны, приводящей к катастрофическим разрушениям [9–11]. Для того чтобы избежать взрывов в угольных шахтах, необходимо изучить механизм первичного фрикционного воспламенения. Подробный анализ всех факторов, влияющих на первичное воспламенение, был дан в публикации [9]. В ходе анализа большого числа данных не удалось обнаружить какой-либо корреляции между эмиссией метана с поверхности угольного пласта при выемке угля и фрикционными воспламенениями в шахте. Поэтому представляется разумным исследовать эмиссию других горючих компонентов при выемке угля.

Важно отметить, что уголь в значительной мере состоит из органических соединений. При нагреве без доступа воздуха до температуры 500 °С из него выделяется смола, состоящая из парафинов, эфиров, фенолов, кетонов, карбонатных кислот и других органических соединений [12]. Содержание органических соединений в бурых и каменных углях обычно составляет 30–40 мас.%. Поэтому следует учитывать эмиссию этих органических соединений в атмосферу при выемке угля для оценки взрывобезопасности, поскольку их высокая концентрация вблизи режущей кромки зубцов шнека может существенно повысить вероятность первичного воспламенения.

В данной статье исследуется механизм выделения органических соединений из угля при механическом воздействии на него и влияния этих соединений на воспламенение метановоздушных смесей. Было исследовано образование органического аэрозоля в “Шахте имени 7 ноября” (Кузнецкий угольный бассейн). Для того чтобы оценить степень влияния органического аэрозоля на взрывоопасность метановоздушных смесей, в лабораторных условиях был синтезирован органический аэрозоль, аналогичный тому, который образуется в угольной шахте при работе очистного комбайна, и измерен нижний предел воспла-

менения метано-воздушных смесей с добавлением органических аэрозольных частиц.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе данной работы и ранее проведенных экспериментов [13–15] установлено, что при механическом воздействии на каменный уголь происходит эмиссия органических соединений, приводящая к образованию органического аэрозоля. Для измерения спектра размеров аэрозольных частиц и их концентрации использовался портативный диффузионный спектрометр аэрозоля и оптический спектрометр аэрозоля, разработанные в Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН. Оба прибора позволяют измерять концентрацию аэрозоля в диапазоне $10\text{--}10^9\text{ см}^{-3}$ (при использовании динамического разбавления аэрозоля) и распределение по размерам в диапазонах 3–1100 и 300–10000 нм соответственно.

Методика аэрозольного анализа приведена на рис. 1. При анализе аэрозоля из шахты или из лабораторного генератора аэрозольный поток предварительно осушался. Осушитель необходим, в частности, потому, что в шахте высока концентрация воды в атмосфере из-за орошения шнеков комбайна водой. Осушение потока происходило с помощью силикагеля, зафиксированного цилиндрической сеткой, создающей внутренний канал для аэрозоля диаметром 1 см, из которого пары воды диффундируют через сетку к поверхности гранул силикагеля. Образцы для электронной микроскопии отбирались термофоретически. Для отбора проб использовалось устройство, представляющее собой кварцевую трубку (внутренним диаметром 1.0 см), через которую продувался аэрозольный поток. Поток проходил над специальной электронно-микроскопической медной сеткой, покрытой поливинилформвалевой пленкой (прозрачной для электронного пучка). Сетка была прижата к внутренней поверхности трубки, при этом внешняя поверхность трубки охлаждалась жидким азотом. Таким образом, в области сетки создавался радиально направленный градиент температуры, приводящий к термофоретическому осаждению частиц.

Для моделирования механического воздействия зубцов шнека очистного комбайна в лабораторных условиях был разработан и изготовлен генератор угольной пыли (проточная роторная ножевая мельница). В рабочей камере мельницы объемом 200 см³ происходит механическое дробление угля вращающимися ножами с частотой вращения 6000 об/мин. Радиус вращения дробящей кромки ножа составляет 70 мм в камере с углом. Через камеру продувается инертный газ (Ar или He) со скоростью 3–10 см³/с. В результате из камеры выходит аэрозольный поток, содержа-

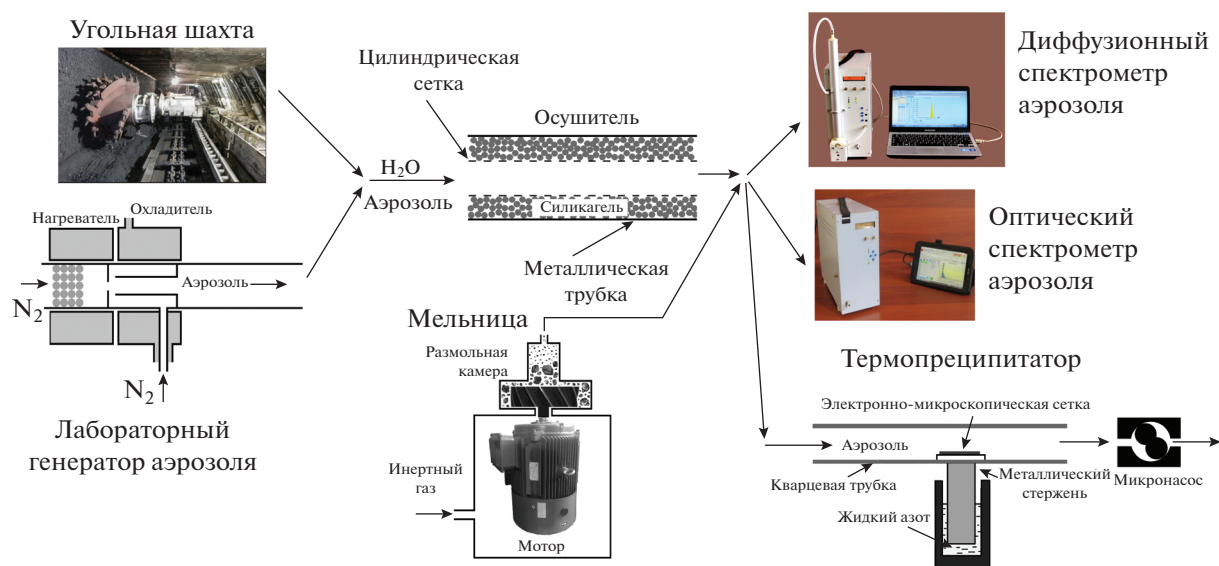


Рис. 1. Схема отбора и анализа аэрозоля.

ший угольные частицы, полученные дроблением, и органические частицы, образованные при испарении органических компонентов при локальном нагреве угля в месте удара. Масса загрузки угля составляла 25 г. Во время работы мельницы стационарная температура в камере измельчения составляла 80°C. Анализ газообразных продуктов, образующихся при работе мельницы, проводился методом ИК-спектроскопии (спектрометр Bruker Vector 22 FTIR) и с помощью масс-спектрометра SRS (Stanford Research Systems) модели RGA 300.

Для исследования влияния органического аэрозоля на воспламенение метановоздушных смесей был использован сферический реакционный сосуд, снабженный оптическими окнами (“бомба”), объемом 10 л, созданный в ИХКГ СО РАН. Воспламенение производилось с помощью нихромового нагревателя, расположенного в центре “бомбы”. Нагреватель был выполнен в виде двойной спирали длиной 15 мм и диаметром 2 мм. Поджиг осуществлялся разрядом конденсатора через спираль. Время разряда и энергия составляли соответственно $1.8 \cdot 10^{-3}$ с и 8 Дж. Рост давления регистрировался с помощью индуктивного датчика с динамическим диапазоном 0–30 атм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе изучения механизма аэрозолеобразования в угольных шахтах проводились отборы частиц для электронно-микроскопического анализа в забое угольной “Шахты имени 7 ноября” (Кузнецкий угольный бассейн). Там же проводилось измерение спектра размеров с помощью диффузионного аэрозольного спектрометра и оптического счетчика аэрозоля. Вентиляция призабойного пространства

проводилась потоком воздуха с линейной скоростью ≈ 5 м/с. Аэрозольная аппаратура была установлена в 30 м от работающего очистного комбайна ниже по потоку воздуха. Измеренная аэрозольная концентрация в призабойном пространстве составила $5 \cdot 10^5$ см⁻³. Типичный спектр размеров частиц приведен на рис. 2а. Здесь же приведены электронно-микроскопические изображения этих частиц. Видно, что в спектре присутствуют три моды с характерным размером частиц 10, 100 и 1000 нм. Частицы размером 10 нм не могли образоваться путем дробления угольной массы, поскольку в результате дробления обычно образуются частицы размером из микронного диапазона. Кроме того, характерная сферическая форма этих частиц указывает на то, что они образовались в результате нуклеации из пересыщенного пара органических соединений. Частицы размером 100 нм представляют собой агрегаты, состоящие из малых первичных частиц. Данные агрегаты образовались в результате коагуляции малых одиночных частиц. Частицы размером ~ 1000 нм, очевидно, получены дроблением угольной массы, о чем, в частности, свидетельствует их неправильная форма.

Для того чтобы подтвердить предположение о том, что моды 10 и 100 нм образуются при механическом воздействии на уголь, был исследован аэрозоль, образующийся при дроблении угля в проточной мельнице. Уголь был взят из “Шахты имени 7 ноября” и содержал около 35% органических соединений (алканы, полициклические соединения и т.п.) в своем составе. На рис. 2б приведен спектр размеров аэрозольных частиц, отобранных из потока, выходящего из мельницы. Можно уви-

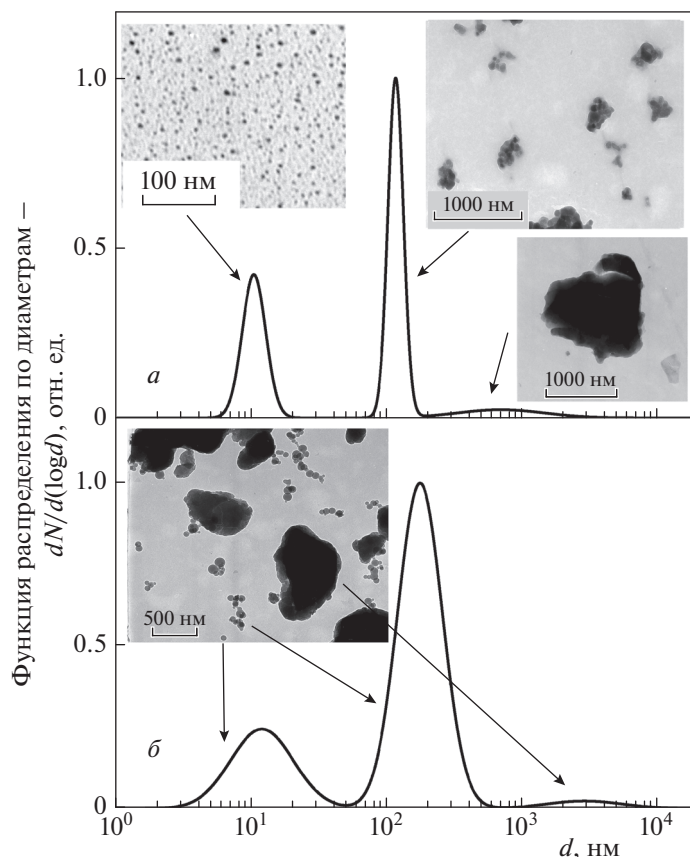


Рис. 2. Спектры размеров частиц и их электронно-микроскопические изображения: *а* — частицы в атмосфере угольной шахты; *б* — частицы, образующиеся при размоле в мельнице.

деть, что наблюдается качественное согласие со спектром аэрозоля из шахты. В спектре, полученном из мельницы, также содержатся три моды с размерами около 10, 100 нм и в микронном диапазоне. Мода вблизи 10 нм представлена сферическими частицами, образованными, очевидно, в результате гомогенной нуклеации из пересыщенного пара органических соединений. Мода вблизи 100 нм состоит из агрегатов, образованных в результате коагуляции одиночных сферических частиц. Мода в микронном диапазоне состоит из частиц, образованных при дроблении угольной массы. Таким образом, эксперименты с проточной мельницей подтверждают гипотезу о том, что наноразмерные частицы в шахте образованы в результате гомогенной нуклеации пересыщенного пара органических соединений, выделяющихся из угля в результате локального нагрева при механическом воздействии.

Химический состав органических частиц, образованных при размоле угля, был нами подробно изучен в публикации [13] с помощью хромато-масс-спектрометрии. Было установлено, что состав органических компонент угля был идентичен составу органического аэрозоля, за исключением легких

алканов $C_{10}-C_{13}$, которые отсутствовали в спектрах частиц. Причина такого расхождения, по-видимому, в том, что парциальные давления легких алканов были ниже упругости пара, и потому эти соединения не участвовали в гомогенной нуклеации. Массовые соотношения алканов и ароматических соединений в угле и аэрозольных частицах одинаковы и примерно составляют 1 : 1. Данные хромато-масс-спектрометрического анализа также подтверждают гипотезу о механизме образования наноразмерного аэрозоля при механическом воздействии на уголь в результате гомогенной нуклеации. Таким образом, проточная мельница является достаточно хорошей моделью очистного комбайна.

При дроблении угля помимо аэрозоля образуются также газообразные продукты. Масс-спектрометрический анализ показал, что основными газообразными продуктами являются CO , CO_2 , H_2O , CH_4 и другие газообразные углеводороды, причем доля этана в алканах составляет 85% (см. методику масс-спектрометрического анализа продуктов размола в [14]). Кинетика выделения газообразных продуктов в ходе размола изучалась с помощью ИК-спектрометра, снабженного проточной кюветой, так что в ходе размола продукты

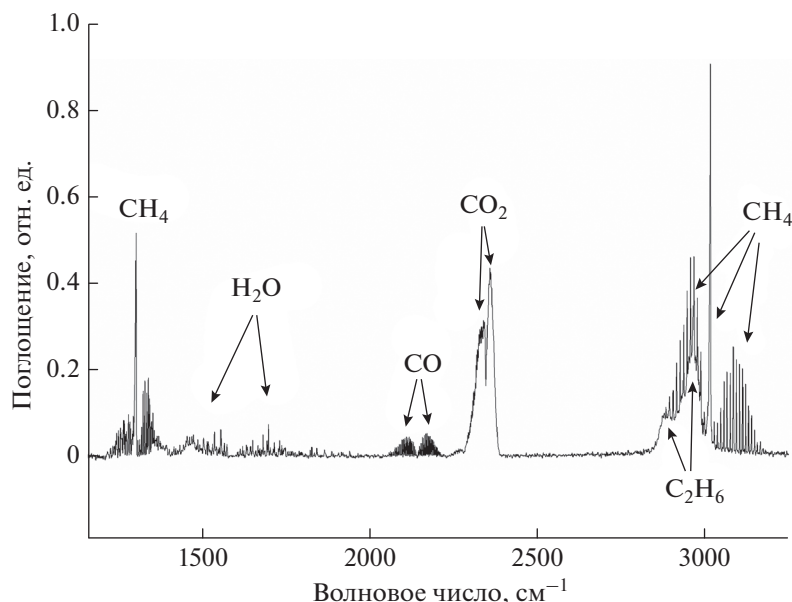


Рис. 3. Типичный ИК-спектр газообразных продуктов, образующихся при размоле угля в проточной мельнице.

продувались через кювету со скоростью $3.5 \text{ см}^3/\text{с}$. Типичный ИК-спектр представлен на рис. 3 (подробности ИК-анализа приведены в работе [14]).

Кроме концентраций газообразных продуктов размола измерялась массовая концентрация органического аэрозоля в потоке, выходящем из мельницы. Для этого в угле определялось содержание летучих компонентов (на единицу массы угля) до и после размола. В ходе эксперимента уголь нагревался в потоке аргона до температуры 870 К с постоянной скоростью 3.0 К/с . Затем температура поддерживалась постоянной в течение 30 мин . Масса летучих компонентов определялась по убыли массы угля в результате нагрева. Разность масс летучих компонентов (на единицу массы угля) до и после обработки в мельнице дает общее количество летучих компонентов, выделившихся в газовую фазу. После вычитания количества CH_4 , высших углеводородов, CO , CO_2 , H_2O , выделившихся в газовую фазу (по данным ИК-спектроскопии), получаем массовую концентрацию органического аэрозоля.

Зависимости концентрации продуктов, выделяющихся при размоле в газовую фазу, от времени работы мельницы приведены на рис. 4. Видно, что концентрации CH_4 , C_2H_6 , CO , CO_2 достигают своего максимума примерно через 3.5 мин после начала размола; концентрация аэрозоля достигает стационарного значения через 8 мин после начала эксперимента. Максимальная концентрация метана составляет $10 \text{ мольн.}\%$ (65 г/м^3). Стационарная концентрация органического аэрозоля составляет 100 г/м^3 , что заметно превышает максимальную концентрацию метана. Важно отметить, что счетная

концентрация органического аэрозоля в потоке, выходящем из мельницы, составляет $4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, что на два порядка выше таковой, измеренной в угольной шахте. Относительно низкая концентрация аэрозоля в шахте обусловлена сильным разбавлением в результате вентиляции, но вблизи зубцов шнека комбайна она может быть очень большой, о чем свидетельствует наличие аэрозольных агрегатов. При локальном прогреве угля до нескольких сот градусов происходит кипение органических компонентов (температура в 610 К соответствует температуре кипения алкана C_{20}), поэтому локальное парциальное давление пара достигает 1 атм [14]. Таким образом, наличие органического аэрозоля может существенно влиять на нижний предел воспламенения метановоздушной смеси, что важно учитывать при прогнозировании вероятности первичного воспламенения. Далее в статье мы приведем результаты измерения нижнего предела воспламенения метановоздушной смеси, содержащей органический аэрозоль.

Для того чтобы синтезировать органический аэрозоль, близкий по составу и морфологии к таковому в угольной шахте, мы использовали термоконденсационный метод генерации. В качестве материнской субстанции для генерации аэрозоля использовалась каменноугольная смола, приготовленная из угля “Шахты имени 7 ноября”. Для того чтобы экстрагировать смолу, мы грели уголь в потоке аргона в вертикальном проточном реакторе в течение 5 ч при температуре 620 К . Смола стекала вниз в виде жидкой массы в стеклянный контейнер, находящийся при комнатной температуре. Далее собранная смола обезгажива-

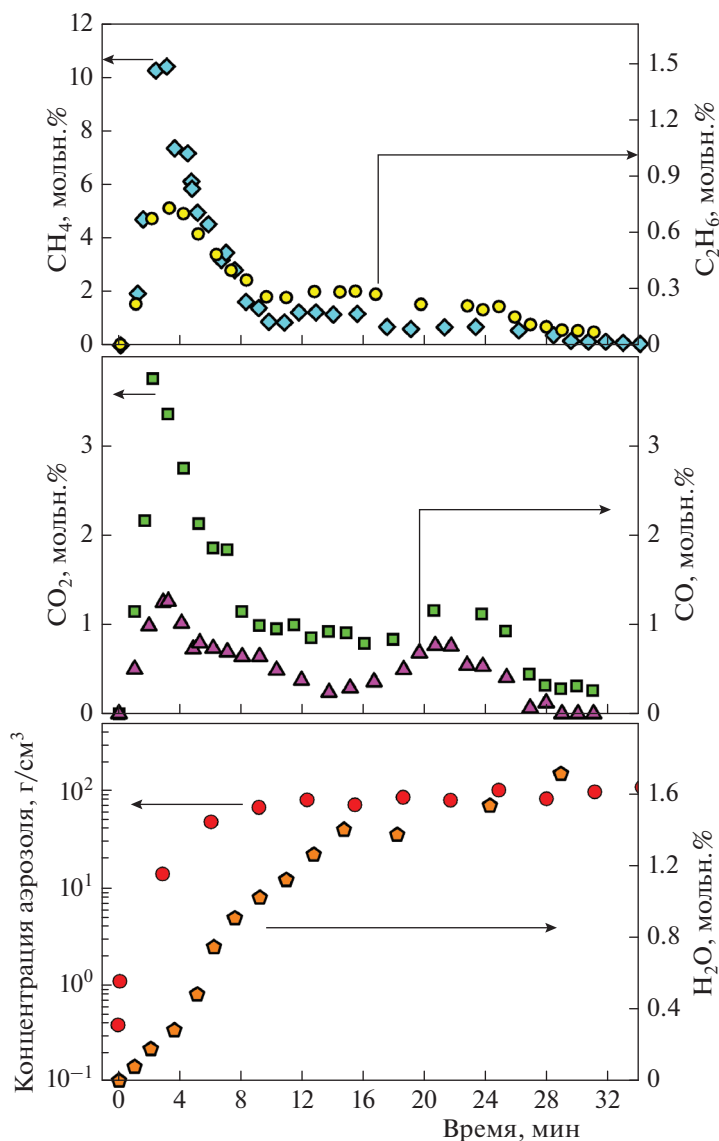


Рис. 4. Концентрации продуктов, выделяющихся в газовую фазу при размоле угля в проточной мельнице, в зависимости от времени ее работы.

лась от летучих углеводородов (метан, этан и т.п.) продуванием через нее аргона в барботере при температуре 373 К в течение 8 ч. Полученная таким образом смола помещалась в проточный термоконденсационный генератор (см. рис. 1), состоящий из двух последовательно соединенных камер: камеры испарения и камеры нуклеации. Цилиндрическая камера испарения внутренним диаметром 2.0 см и длиной 10.0 см продувалась азотом с объемной скоростью потока, равной 0.5 л/мин. Температура испарения 700 К достигалась с помощью внешнего нагревателя. Поток азота, насыщенный паром органических соединений, подавался далее в камеру нуклеации внутренним диаметром 2.0 см и длиной 7.0 см, где он смешивался с холодным (разбавляющим) пото-

ком азота. Объемная скорость разбавляющего потока составила 1.0 л/мин. Температура разбавляющего потока в 170 К достигалась путем охлаждения внешней рубашки, через которую продувался холодный поток, вытесняемый из сосуда Дьюара с жидким азотом. Далее, на выходе из камеры нуклеации в аэрозольный поток подмешивался кислород в таком количестве, чтобы отношение O_2/N_2 соответствовало таковому в воздухе. Таким образом моделировалась смесь органических частиц с воздухом. Морфология частиц анализировалась с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Массовая концентрация определялась отбором частиц аэрозоля на фильтр Петрянова [16]. Далее поток смешивался с метаном и им заполнялась “бомба” для измерения ки-

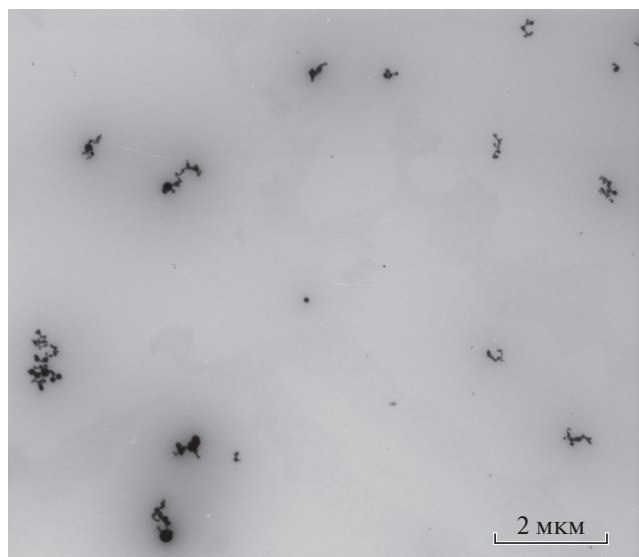


Рис. 5. Типичное изображение аэрозольных частиц, полученных с помощью лабораторного генератора органического аэрозоля.

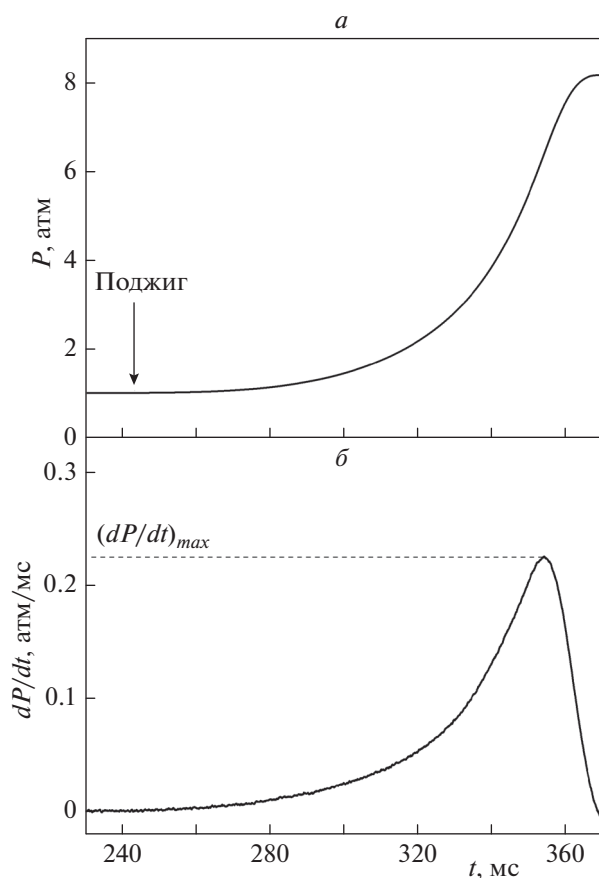


Рис. 6. Зависимость от времени давления в “бомбе” (а) и скорости нарастания давления (б) при горении метановоздушной смеси с органическими аэрозольными частицами. Массовые концентрации аэрозоля и метана равны соответственно 40 и 20 г/м³.

нетики нарастания давления после воспламенения. Полученную смесь N₂ и O₂ с метаном будем называть метановоздушной смесью. Типичное изображение аэрозольных частиц, полученных в лабораторных условиях, приведено на рис. 5.

Исследование влияния органического аэрозоля на процесс горения метановоздушной смеси проводилось в “бомбе” объемом 10 л. Для этого поток органических частиц с метановоздушной смесью продувался через “бомбу” при атмосферном давлении и комнатной температуре с объемной скоростью 2 л/мин. На рис. 6 приведена типичная зависимость нарастания давления в “бомбе” после воспламенения смеси с массовой концентрацией аэрозоля 40 г/м³ и концентрацией метана 3 мольн.% (20 г/м³). Здесь же приведена временная зависимость производной давления dP/dt . Удобно использовать максимальное значение производной $(dP/dt)_{max}$ для того, чтобы охарактеризовать взрывоопасность смеси. На рис. 7 в качестве примера приведена зависимость максимума производной $(dP/dt)_{max}$ от массовой концентрации органического аэрозоля при постоянной концентрации метана в смеси (3 мольн.%). Видно, что воспламенение смеси происходит при массовой концентрации аэрозоля, превышающей 20 г/м³. Эта концентрация определяет нижний предел воспламенения метано-воздушной смеси с органическими частицами. Удобно представить нижний предел воспламенения в координатах массовых концентраций органического аэрозоля и метана, см. рис. 8. На этом рисунке точки нижнего предела хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. По-

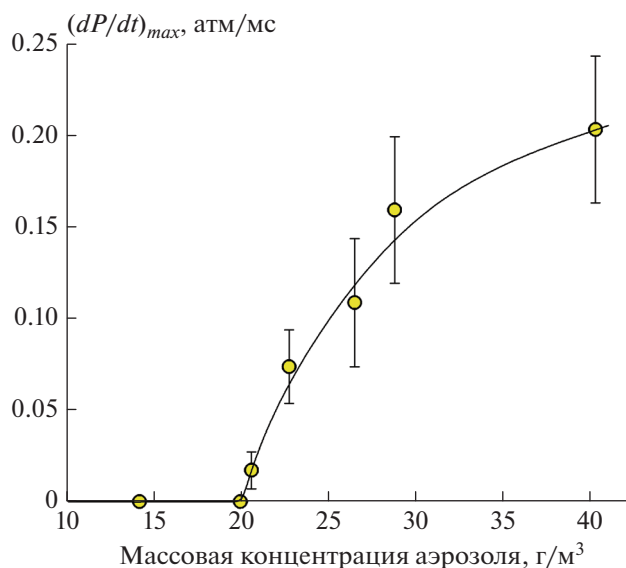


Рис. 7. Зависимость максимума производной давления в бомбе $(dP/dt)_{max}$ от массовой концентрации органического аэрозоля при постоянной концентрации метана в смеси (3 мольн.%).

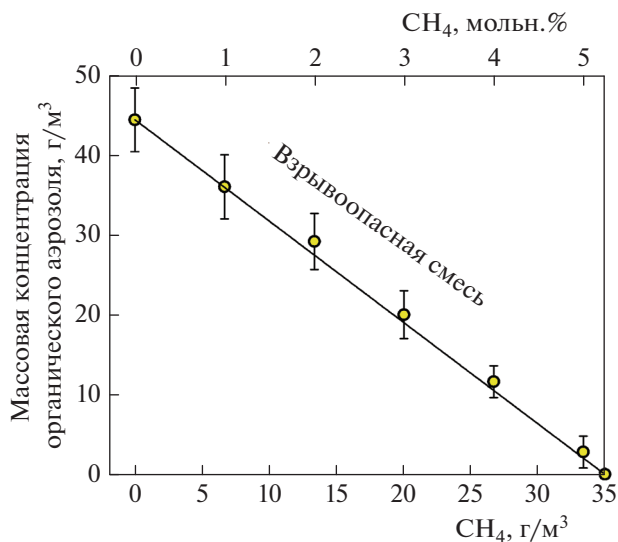


Рис. 8. Нижний предел воспламенения метановоздушной смеси с органическим аэрозолем.

следнее указывает на то, что выполняется принцип Ле Шателье, который можно представить в виде [17]

$$\frac{C_p}{C_p^0} + \frac{C_{CH_4}}{C_{CH_4}^0} = 1,$$

где C_p — предельная минимальная массовая концентрация органических аэрозольных частиц в смеси с массовой концентрацией метана C_{CH_4} , при которой происходит воспламенение; C_p^0 и $C_{CH_4}^0$ — минимальные массовые концентрации аэрозольных частиц и метана в смесях частицы—воздух и метан—воздух, соответственно, при которых происходит воспламенение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что при механическом воздействии на уголь наряду с эмиссией газообразных горючих соединений происходит выделение высокомолекулярных углеводородов, что, в свою очередь, приводит к образованию органического аэрозоля. Причем количество образующегося органического аэрозоля близко к количеству выделяющегося метана. Поэтому для оценки вероятности первичного воспламенения необходимо учитывать образование органического аэрозоля. В данной работе был определен нижний предел воспламенения метановоздушной смеси с органическим аэрозолем. Концен-

трации метана и аэрозоля варьировались в пределах 0–6.5 мольн.% и 0–50 г/м³ соответственно. Показано, что нижний предел воспламенения хорошо описывается аддитивным принципом Ле Шателье. Полученные зависимости нижнего предела от концентраций горючих компонентов могут оказаться полезными в вопросах улучшения взрывобезопасности в угольных шахтах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований и Новосибирской областью в рамках научного проекта № 19-43-540009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семёнов Н.Н. Цепные реакции. Л.: Госхимтехиздат, 1934.
2. Семёнов Н.Н. // УФН. 1940. Т. 23. Вып. 3. С. 251.
3. Семёнов Н.Н. // УФН. 1940. Т. 24. Вып. 4. С. 433.
4. Лебецки К.А., Романченко С.Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. Т. 6. М.: Промышл. безопасность, 2012.
5. Cheng J. Explosions in underground coal mines. Risk assessment and control. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
6. Trueman R. // J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 1985. V. 85. № 7. P. 209.
7. Phillips H.R. Identify methods to reduce the risk of explosions and fires caused by frictional ignition hazards. Final project report. No. COL226. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 1996.
8. Pomroy W.H., Carlgiel A.M. Analysis of underground coal mine fire incidents in the United States from 1978 through 1992. Information circular 9426. United States Bureau of Mines, 1995.
9. Krog R.B., Schatzel S.J. // Mining Eng. 2009. V. 61. № 8. P. 28.
10. Cheng L., Furno A.L., Courtney W.G. Reduction in frictional ignition due to conical coal-cutting bits. Report of investigations 9134. Bureau of Mines. United States Department of the Interior, 1987.
11. Pejic L.M., Torrent J.G., Añez N.F., Escobar J.M.M. // J. Mining Institute. 2017. V. 225. P. 307.
12. Рашевский В.В., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Качество углей ОАО «СУЭК». М: Кучково поле, 2010.
13. Валиулин С.В., Бакланов А.М., Дубцов С.Н. и др. // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 4. С. 36.
14. Onischuk A., Dubtsov S., Baklanov A. et al. // Aerosol and Air Quality Res. 2017. V. 17. № 7. P. 1735.
15. Valiulin S.V., Onischuk A.A., Zamashchikov V.V. et al. // Intern. J. Coal. Sci. Technol. 2020; <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00313-4>
16. Kirsch A.A., Stechkina I.B., Fuchs N.A. // J. Aerosol Sci. 1975. V. 5. P. 119.
17. Landman G.V.R. // J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 1995. January/February. P. 45.