

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1+614.83

ЧТО ГОРИТ В ШАХТЕ: МЕТАН ИЛИ УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ?

А. А. Васильев^{1,2}, А. В. Пинаев¹, А. А. Трубицын¹, А. Ю. Грачёв¹,
А. В. Троцюк¹, П. А. Фомин¹, А. В. Трилис¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, gasdet@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Обсуждены возможные сценарии воспламенения и развития взрыва в шахтах. Экспериментально показана принципиальная возможность полного гашения детонации и горения с помощью завесы из инертных частиц. Учитывая сложность процесса гашения сформировавшейся детонации, рекомендуется сосредоточить внимание на начальной стадии воспламенения метановоздушной смеси, когда можно добиться эффективного гашения очага возгорания применением методов современного автоматического контроля и управления с четким выполнением пространственно-временных требований.

Ключевые слова: метан, угольная пыль, горение, детонация, пределы, переход горения в детонацию, шахтные взрывы, подавление взрывов.

DOI 10.15372/FGV20170102

Метан и угольная пыль традиционно рассматриваются как основные горючие компоненты, сопровождающие процесс угледобычи. К настоящему времени экспериментально достаточно подробно изучены процессы низкоскоростного горения метановых смесей. Высокоскоростные процессы нестационарного горения метановоздушных смесей (например, процесс ускорения пламени вплоть до перехода горения в детонацию) и тем более детонации изучены значительно меньше.

К сожалению, даже в современной справочной литературе по безопасности (см., например, [1–10]) процессы низкоскоростного и высокоскоростного горения все еще рассматриваются в рамках единого термина «пожаровзрывоопасность» (например, в [1, 2] концентрационные пределы метановоздушных смесей названы концентрационными пределами взрыва, 5 ÷ 15 %). С научной точки зрения термин «пожаровзрывоопасность» нельзя признать корректным, поскольку, как правило, пожароопасность связана с низкоскоростным горением, а взрыв — со сверхзвуковыми течениями, сопровождаемыми ударными волнами. Несопоставимы и последствия пожара и взрыва горючей смеси по динамическому воздей-

ствию. Потому применительно к шахтам основной является не только задача предупреждения аварийных взрывов, но и (в случае возникновения взрыва) задача максимального ослабления взрывных волн с помощью различных устройств. При этом до сих пор на практике за основу берутся устройства, создающие «заслоны» из инертной или активной (ингибиторы) пыли, распылов мелкодисперсной воды и т. д. К сожалению, трагические случаи, до сих пор происходящие на шахтах многих стран (Россия, Украина, ЮАР, Китай, Турция и др.), свидетельствуют о низкой эффективности подобных систем.

Для оценки последствий аварийного возгорания метана, одного из главных виновников трагедий на шахтах, необходимо четко представлять возможные сценарии возникновения и развития очага горения в условиях шахт, чтобы максимально обезопасить людей и оборудование от воздействия горячих продуктов.

Для оценки гасящей способности различных завес необходимо экспериментально подтвердить принципиальную возможность полного гашения детонационной волны от скорости детонации D_0 до скорости акустической волны сжатия c_0 , неспособной повторно воспламенить горючую смесь.

Сложность задач воспламенения и гашения усугубляется тем, что волны горения и детонации, распространяющиеся в метановоздушной смеси характеризуются, как минимум,

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН РАН на 2014–2020 гг.

© Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А.,
Грачёв А. Ю., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трилис
А. В., 2017.

триа важнейшими признаками:

- а) огромным диапазоном реализуемых параметров по скоростям (от глубоко дозвуковых величин на уровне сантиметров в секунду до сверхзвуковых на уровне километров в секунду), давлениям (от нормального атмосферного до сотен атмосфер), температурам (до нескольких тысяч градусов);
- б) значительной неоднородностью параметров в пространстве, особенно сильно влияющей на кинетику воспламенения и горения горючей смеси;
- в) гетерогенным характером как системы метан — воздух — инертная пыль для гашения волны, так и двухтопливной горючей системы метан — воздух — угольная пыль (с химически активным твердофазным топливным компонентом).

Гетерогенность системы требует учета многих новых физических взаимодействий между фазами (пункт в)). Например, частица завесы, подвергнувшись воздействию ударной волны, начинает ускоряться за счет сил аэродинамического взаимодействия. Одновременно с ускорением частица начинает прогреваться в нагретом потоке окружающего газа. Импульсное воздействие давления может спровоцировать разрушение частицы на части. Нагрев частицы выше температуры плавления материала приведет к образованию жидкой пленки на ее поверхности. Пленка в условиях высокоскоростного потока окружающего газа (скорость — несколько сотен метров в секунду — в десятки раз превышает скорость урагана) начнет терять массу за счет срыва микрокапель с ее поверхности.

Недостаточно изученным является вопрос о поведении волн горения и детонации в гетерогенной среде при увеличении доли конденсированной фазы — переход от газозвеси с пренебрежимо малой долей частиц (почти идеальный газ) к другому предельному случаю — малой доле газа в пылевой насыщенной среде (или мелкопористой спрессованной). При увеличении доли конденсированной среды существенно меняется механизм распространения волн горения и детонации за счет возрастающей роли потерь энергии и импульса, затрачиваемых горючей смесью на конденсированную фазу. Напомним, что самоподдерживающимися являются лишь отдельные режимы распространения волн горения и детонации (ламинарное горение, классическая детонация и дефлагра-

ция), практически весь диапазон скоростей — от сантиметров до километров в секунду — отдан во власть нестационарным режимам. При этом, наряду с ожидаемым ослаблением детонационной волны и ее переходом к волне сверхзвукового горения, абсолютно не исключаются процессы нового ускорения ослабленной волны за счет искусственной турбулизации фронта пламени на частицах гетерогенной среды и ускорения перехода горения в детонацию.

Весьма непросто вопрос о горении угля, включающий в себя такие физические процессы, как выход летучих компонентов при нагреве и пиролизе угольных частиц с образованием газообразной горючей смеси, ее воспламенением и горением, поверхностным горением самой твердофазной частицы, возможным разрушением частицы и т. д. Эти процессы зависят от характерных размеров частиц, их химического состава, степени зольности и т. д. Поэтому орошение пыли водой и водными растворами поверхностно-активных веществ, связывание пыли с помощью различных клеевых композиций, добавка в пыль инертных и флегматизирующих материалов представляются естественными способами предупреждения взрывов пыли.

Традиционно датчики метана начинают подавать сигналы опасности при концентрации метана 2 %, что примерно в 2.5 раза меньше нижнего концентрационного предела воспламенения (КПВ) метановоздушной смеси. По существующим представлениям при концентрации 2 % смесь не способна даже воспламениться, потому ничего страшного произойти не должно бы. Почему же смесь все-таки загорается за границей нижнего концентрационного предела? При средней температуре по больнице, близкой к нормальной, можно ли сделать вывод об отсутствии больших с высокой температурой? Отрицательный ответ хорошо известен. Отметим, что минимальная критическая энергия искрового зажигания метановоздушной околостехиометрической смеси составляет всего 0.28 мДж, при сдвиге к границам КПВ энергия воспламенения заметно возрастает.

Одно из правдоподобных объяснений возгоранию — залповый выброс метана из угольной породы. Действительно, зажаты в угольной породе метан находится под горным давлением $p = p_0 + \rho g Y$ (ρ — плотность земного грунта, g — земное ускорение, Y — глубина залегания штрека от уровня земной

поверхности), а давление в штреке системой вентиляции поддерживается на уровне атмосферного p_0 . Поскольку горное давление много больше атмосферного, на границе угольный пласт — газообразная атмосфера штрека возникает большой градиент давления, что может ослабить прочность поверхностного слоя угля с образованием в нем трещин и привести к выбросу метана из близко расположенной к штреку полости внутрь штрекового пространства. Дальнейшие события вполне объяснимы: струя метана, истекающая в пространство штрека, будет иметь высокую концентрацию метана на оси струи и при смешении с воздухом на границе струи всегда найдется локальная область с составом смеси, попадающим внутрь концентрационных пределов, и даже с минимальной энергией инициирования. Другими словами, при средней концентрации метана по штреку вне нижнего концентрационного предела при залповых выбросах метана могут возникать локальные зоны, в которых смесь вполне способна воспламениться под воздействием какого-либо инициатора. Сгорая, такие локальные зоны с высокой температурой продуктов и активными радикалами представляют собой своеобразные вторичные инициаторы. Если в штрековом пространстве возникнут локальные области горючей смеси, они могут воспламениться уже от таких вторичных инициаторов. Наиболее опасной зоной возникновения подобных выбросов является область непосредственно вблизи режущих головок проходческого комбайна, которые не только вскрывают угольный пласт с образованием избыточной концентрации угольной пыли в воздухе, но и увеличивают опасность возникновения случайных искр при соприкосновении режущих кромок с пластом и их нагреве при работе. Именно на проходческом комбайне должны размещаться системы водного орошения для противодействия пылеобразованию, а также системы подачи ингибиторов, препятствующих воспламенению метановоздушных смесей.

Вторая причина заключается в том, что шахтный метан на самом деле не является стопроцентно чистым химическим соединением, а представляет собой смесь различных газов, среди которых, например, метана — 90 %, водорода — 3 %, тяжелых углеводородов — 4 %, других примесей — 3 %. Конкретные количества компонентов не столь важны, важен факт присутствия других веществ с гораздо мень-

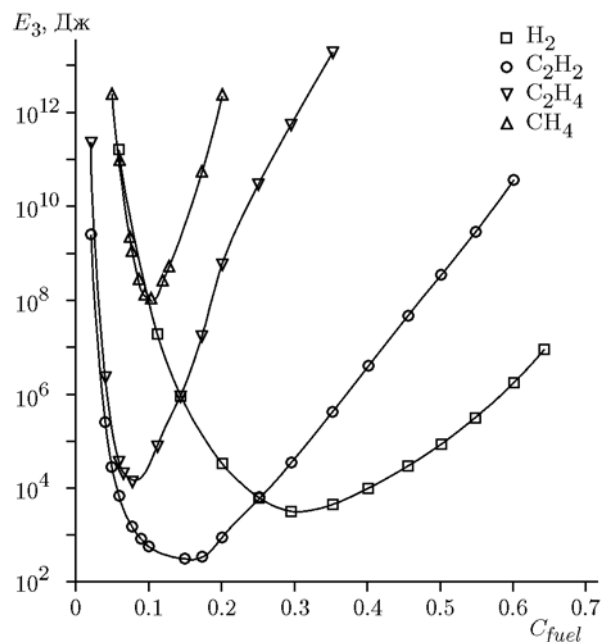


Рис. 1. Критическая энергия инициирования сферической детонации наиболее типичных топлив

шей энергией инициирования, нежели у метана. На рис. 1 приведены данные о критической энергии инициирования сферической детонации четырех типичных топлив: метана CH_4 (полностью заполненные одинарные связи углерода), этилена C_2H_4 (двойная связь между атомами углерода), ацетилена C_2H_2 (тройная углеродная связь) и водорода H_2 . Хотелось бы обратить внимание на то, что три последних топливных компонента имеют энергию инициирования на несколько порядков меньшую, чем метановоздушная смесь: $E_{\text{C}_2\text{H}_4} \approx 3.7 \cdot 10^4$, $E_{\text{C}_2\text{H}_2} \approx 1.5 \cdot 10^3$, $E_{\text{H}_2} \approx 3.2 \cdot 10^3$, $E_{\text{CH}_4} \approx 7 \cdot 10^7$ Дж. Для сравнения приведем данные по минимальной критической энергии искрового зажигания смесей вышеуказанных топлив с воздухом: $E_{\text{C}_2\text{H}_4} \approx 0.075 \cdot 10^{-3}$, $E_{\text{C}_2\text{H}_2} \approx 0.017 \cdot 10^{-3}$, $E_{\text{H}_2} \approx 0.02 \cdot 10^{-3}$, $E_{\text{CH}_4} \approx 0.28 \cdot 10^{-3}$ Дж. Это означает, что случайный инициатор, который сработает вблизи истекающей из угольной породы «метановой» струи, вызовет воспламенение в первую очередь компонентов с минимальной энергией, а уже горячие продукты реакции этих легко воспламеняющихся компонентов вызовут воспламенение более трудно инициируемых метановых смесей.

Различие на несколько порядков энергии зажигания смеси и энергии инициирования де-

тонации ($E_{CH_4, ign} \approx 0.3$ мДж, в то время как энергия прямого инициирования сферической детонации E_{3*} эквивалентна примерно 17 кг тротила, $E_{ign} \ll E_{DW}$) однозначно свидетельствует о том, что на начальной стадии всегда реализуется лишь воспламенение метано-воздушной смеси. Пламя вначале распространяется из очага воспламенения в режиме ламинарного горения, скорость которого для метановоздушной смеси 0.34 м/с. Если диаметр шахтного штрека взять равным 6 м, то ламинарное пламя полностью перекроет сечение штрека примерно за 17 с (в случае воспламенения вблизи стенки). Реально же ламинарное пламя за счет автотурбуликации будет переходить в турбулентное горение и увеличивать скорость распространения. Максимальная скорость сильно турбулентного пламени ≈ 60 м/с (скорость дефлаграционного горения, определяемая условием касания прямой Михельсона — Рэлея к нижней ветви адиабаты энерговыделения). При сильно затурбулированной смеси на перекрытие сечения шахты фронтом турбулентного пламени потребуется примерно 0.1 с. После перекрытия сечения шахты пламя будет распространяться вдоль штрека как своеобразный «поршень», ускоряясь как за счет автотурбуликации, так и за счет искусственной турбуликации при взаимодействии с шероховатостями стенок. Итогом ускоренного движения такого «поршня» станет формирование ударной волны.

Но что произойдет после того, как выброс газа закончится и выгорят все локальные области с концентрациями компонентов, попавшими внутрь концентрационных пределов? На первый взгляд, все течения прекратятся, а пламя затухнет.

Однако нельзя исключать еще одну возможность, хотя и дискуссионную: после выгорания вышеуказанных локальных областей пламя не затухнет — дело не в метановой смеси со средней концентрацией по пространству штрека меньше нижнего концентрационного предела, а, возможно, в воспламенении мелкодисперсной угольной пыли, поднятой с поверхности штрека системой вентиляции?!

Каждый, вероятно, наблюдал следующую картину: когда солнечный луч попадает в затененную комнату, в этом луче невооруженным взглядом четко видны взвешенные в воздухе частицы (даже в чисто убранной комнате, где нет никакого движения воздуха, кроме

молекулярного). Практически все видели документальные кадры запыленных лиц шахтеров, выходящих из штрека. Данные о запыленности воздуха в шахтах свидетельствуют о том, что наибольшая запыленность, как правило, наблюдается при работе проходческих комбайнов: при отсутствии средств борьбы с пылью ее концентрация может достигать нескольких граммов в 1 м³ воздуха. При этом наблюдается высокая дисперсность взвешенной в воздухе угольной пыли: до 40 ÷ 80 % пылевых частиц имеют размеры до 1.3 мкм, 15 ÷ 35 % — до 2.6 мкм, 5 ÷ 20 % — до 4 мкм и 3 ÷ 10 % — свыше 4 мкм. Не последнюю роль в этом играет воздух, прокачиваемый системой вентиляции. Именно вентиляционный воздух постоянно возмущает угольную пыль и поднимает наиболее легкие мелкодисперсные частицы с пола или сдувает их со стен штрека.

Сделаем оценку возможных концентраций взвешенной в потоке вентиляционного воздуха угольной пыли. Стехиометрическая концентрация пыли определяется составом $C + O_2 + 3.76N_2$, откуда молярная доля угольной пыли $C_{st} = 1/5.76 = 0.174$. У гетерогенных смесей предельные концентрации измеряются не в молярных долях (как у газов), а в массовых концентрациях. 1 моль угольно-воздушной смеси при $p_0 = 1$ атм и $T_0 = 298$ К занимает объем 24.46 л при молекулярной массе $\mu = (12 + 32 + 3.76 \cdot 28)/5.76 = 25.92$ г/моль. При этом массовая доля углерода в смеси равна $12/149.3 = 0.08$, что для стехиометрической смеси дает массу угольной пыли $m_C = 0.08\mu = 2.08$ г/моль, откуда плотность угольной пыли $(\rho_C)_{st} = 2.08/24.46 = 0.0842$ г/л = 84 г/м³.

Взрывчатые свойства пыли (как и горючих газов и жидкостей) характеризуются нижним КПВ. По опытным данным нижний предел взрывоопасной запыленности выработок колеблется в пределах 25 ÷ 250 г/м³, хотя для самой опасной угольной пыли нижний КПВ равен 10 г/м³. Для многих гомогенных и гетерогенных систем $C_{low} \approx 0.5C_{st}$, хотя для угольной пыли такая оценка не выполняется даже по минимальной границе нижнего КПВ ($10/25 = 0.4 < 0.5$). Еще один интересный пример для сравнения — это предел взрываемости пыли некоторых взрывчатых веществ: тротил — 42 г/м³, гексоген — 31.5 г/м³, аммонит 6ЖВ — 14.9 г/м³ (данные из [11]).

Другой характеристикой является температура воспламенения угольной пыли —

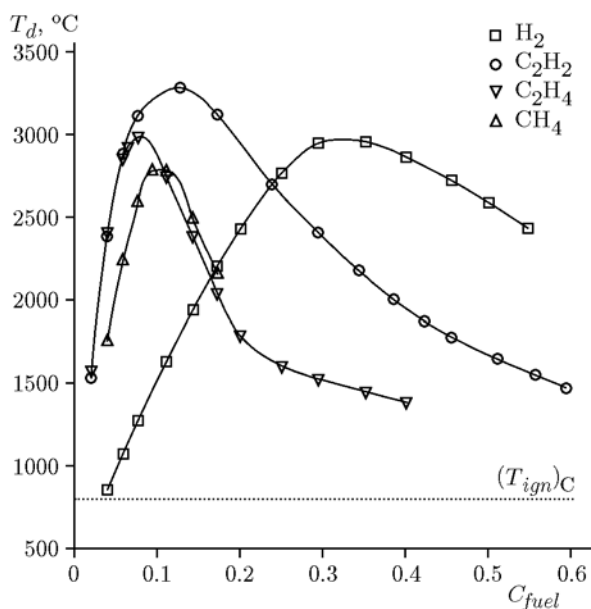


Рис. 2. Температура продуктов детонации наиболее типичных топлив

540 ÷ 630 °С. На рис. 2 приведена зависимость температуры продуктов детонации рассмотренных выше топливовоздушных смесей от молярной концентрации горючего. Четко видно, что практически все эти топлива имеют температуру продуктов выше температуры воспламенения угольной пыли (пунктирная горизонтальная линия). Поэтому локальные области горячих продуктов водорода и прочих углеводородов вполне могут воспламенить угольную пыль.

И еще. Метан с добавками водорода и других углеводородов (тяжелее метана) совместно с угольной пылью представляет собой систему с многими топливными компонентами, для которых существуют свои индивидуальные нижние концентрационные пределы. Известна формула Ле Шателье для нижнего КПВ смеси [6]:

$$L = 100 / \sum_k \frac{m_k}{N_k},$$

здесь N_k — предел горючести каждого индивидуального газового компонента, m_k — содержание каждого горючего газа в составе топливного компонента смеси, %. Из формулы видно, что нижний КПВ смеси будет сдвигаться в сторону меньших значений от нижнего КПВ чистого метана (как основного топливного компонента смеси) при наличии любых дополни-

тельных горючих газов в многотопливной смеси за счет дополнительных слагаемых в знаменателе (сумме) последней формулы. Например, нижний КПВ различных «хороших» сортов угольной пыли в зависимости от выхода летучих веществ и содержания золы лежит в диапазоне 12 ÷ 45 г/м³; если же в шахтной атмосфере дополнительно содержится 1 % метана, то значение нижнего КПВ снижается практически вдвое — до 6 ÷ 23 г/м³! Поэтому настройка датчиков метана на экспериментально определенный и нормативно установленный 2%-й уровень в качестве опасной границы загазованности штрека (при нижнем КПВ 5 %) абсолютно оправдана!

С учетом вышесказанного становится понятным истинный сценарий развития взрыва: локальный выброс струи метана с другими легко иницилируемыми газами (водородом, пропаном, углеводородными топливами вида C_xH_y с $x > 2$), случайная искра вблизи струи, воспламенение в струе водорода, пропана, углеводородов с $x > 2$, а затем и метана, последующее воспламенение угольно-воздушной пылевзвеси в среде горячих продуктов реакции газовых компонентов, распространение по запыленному угольными частицами штреку волны горения и т. д.

При таком сценарии становится очевидной неспособность стационарных станций метанового контроля, находящихся в штреке на достаточном удалении друг от друга, обеспечить достоверное измерение концентрации метана в местах работы шахтеров. Вывод напрашивается сам собой: датчик метана должен «сопровождать» каждого шахтера, чтобы измерять концентрацию непосредственно на рабочем месте, а также одновременно определять координаты шахтера в подземном пространстве. Именно такая автоматизированная система подземного позиционирования разработана в НПО «Гранч» (Новосибирск) и начинает внедряться на шахтах Кузбасса [12].

Таким образом, угольная пыль, как гетерогенная среда, заметно усложняет характер распространения волн горения и детонации. Не меньшее усложнение создает и инертная пыль, предназначенная для подавления волн горения и детонации.

С целью ответа на вопрос о принципиальной возможности гашения наиболее опасного режима распространения в шахте — режима детонации — были проведены эксперименталь-

ные исследования взаимодействия стационарной детонационной волны с пылевой завесой из инертных частиц песка. Подробности экспериментов в вертикальной трубе, в которой пылевое облако формировалось за счет естественного высыпания частиц из генератора пыли (с электромагнитным клапаном управления), описаны в [13, 14], здесь же кратко отметим основные результаты.

На рис. 3 приведен график затухания исходной детонационной волны в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + \text{N}_2$ по мере распространения сквозь пылевую завесу (D — скорость волны, x — координата пылевого облака от его верхней границы, δ — характерный размер частиц песка). Хорошо видно, что степень ослабления детонационной волны по мере распространения сквозь пылевое облако зависит от концентрации и размера частиц. При $p_0 = 0.1$ МПа пылевая завеса длиной около 6 м из частиц песка размером $\delta = 250 \div 600$ мкм со среднеобъемной концентрацией пыли $\rho_d \approx 2.5$ г/л практически не ослабляет детонационную волну. С уменьшением начального давления смеси и размера частиц гасящие свойства пылевой завесы существенно увеличиваются.

Самый главный принципиальный вывод заключается в том, что при определенных условиях ($p_0 = 0.01$ МПа, $\delta = 90 \div 120$ мкм) удается полностью ослабить детонационную волну

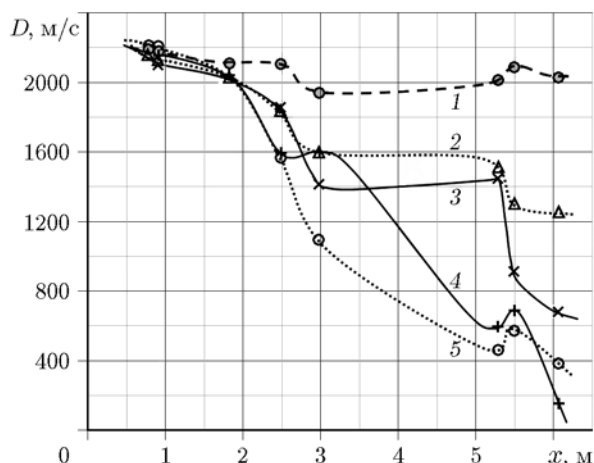


Рис. 3. Затухание исходной детонационной волны по мере распространения по пылевому облаку:

1 — $p_0 = 0.02$ МПа, $\delta = 250 \div 600$ мкм, 2, 3 — два эксперимента при одних и тех же условиях $p_0 = 0.015$ МПа, $\delta = 90 \div 120$ мкм, 4, 5 — два эксперимента при $p_0 = 0.01$ МПа, $\delta = 90 \div 120$ мкм

до уровня звуковой на длине пылевой завесы около 6 м при $\rho_d \approx 2.5$ г/л и сорвать последующее распространение пламени. Последнее чрезвычайно важно, поскольку свидетельствует о принципиальной возможности полного подавления взрывных волн в условиях шахт при научно обоснованном подходе к проблеме предотвращения шахтных взрывов.

Особо хочется отметить важный результат исследований о том, что наличие инертной пыли в газовой смеси приводит к изменению механизма воспламенения во фронте детонации, поскольку возникают дополнительные горячие точки за счет торможения газового потока на частицах. Это может способствовать возникновению вторичной детонации и замедлять затухание волны детонации.

Вышесказанное о механизме воспламенения сразу же проясняет основные требования к системам подавления и их характеристикам для эффективной борьбы с очагом воспламенения. Очевидно, что борьбу необходимо начинать максимально быстро, уже на начальной стадии возгорания, когда еще сохраняются основные преимущества:

- низкая скорость распространения пламени;
- малый размер зоны возгорания;
- максимально возможное время для принятия решения и ввода в действие факторов тушения;
- максимальное время для создания однородного тушащего облака.

Для начальной стадии возгорания основными требованиями к системе пожаротушения являются:

- максимально быстрое обнаружение — оптическая диагностика;
- анализ возникшей ситуации и выбор решения (АСУ);
- передача управления на соответствующие элементы пожаротушения (АСУ);
- максимально быстрый ввод системы гашения в рабочее состояние (взрывное диспергирование порошка, распыл воды);
- однородность тушащего средства по сечению и длине;
- оптимизация по физическим свойствам (учет физических свойств гасящего материала: теплоемкость, масса, поверхность, агрегатное состояние).

Среди возможных методик гашения можно указать уже известные способы, эффективность которых можно повысить:

- инертный газ — выход вне концентрацион-

ных пределов;

- инертные частицы — отбор кинетической и тепловой энергии;
- распыл инертной жидкости — отбор энергии фазовых переходов;
- кинетическое воздействие на детонационную волну и зону пламени;
- многоячейстые «подошки безопасности», быстро перекрывающие сечение штрека;
- «гасящие зазоры» — многоканальные системы с поперечными размерами, удовлетворяющими условию гашения пламени метановоздушной смеси.

Важно обратить внимание на то, что при любых способах гашения обязательным является учет характерных временных и пространственных соотношений: для эффективного гашения масштаб и время физических процессов (ускорение частиц — отбор кинетической энергии, прогрев — отбор тепловой энергии) должны быть меньше, чем химических!

Столь сложная задача о взрывах в шахтах привлекает внимание многочисленных специалистов по численному моделированию газодинамических течений, сопровождаемых химическими реакциями (см., например, [15] и библиографию в ней). Несмотря на значительное число статей, посвященных распространению детонационной волны в пылевом облаке, в большинстве из них сделан некорректный вывод о том, что некоторое уменьшение скорости детонационной волны после входа ее в пылевое облако якобы можно считать срывом детонации. С реальным гашением волны в пылевом облаке (как это хорошо видно на рис. 3) это имеет мало общего: сравните линии 1, 2 с линиями 4, 5. Для практического применения принципиально важно, чтобы волна, пройдя пылевую завесу, не смогла вновь воспламенить смесь в шахте, что накладывает определенное условие на скорость ударной волны при выходе из облака (в [13, 14] — для метановоздушной смеси число Маха ударной волны не должно превышать значение 1.45!).

Экспериментальные профили затухания детонационной волны в пылевой завесе заставили по-иному подойти к задаче моделирования — необходимости учета большинства отмеченных выше аспектов, присущих гетерогенным системам. Предварительные результаты численного моделирования представлены в работах [16, 17].

Двумерное численное моделирование

структуры фронта детонации стехиометрической метановоздушной смеси показало хорошее совпадение поперечного размера ячейки с известными экспериментальными данными. Впервые для смеси с реальными теплофизическими и химическими свойствами в расчетах воспроизведена нерегулярная ячеистая структура со всеми основными ее особенностями: хаотическое несогласованное движение основных поперечных волн; многочисленные вторичные поперечные волны, составляющие иерархию уменьшающихся по размерам возмущений лидирующего ударного фронта детонационной волны; области несогревшей смеси на значительном расстоянии за фронтом детонационной волны; тонкая (ячеистая) структура самой поперечной волны. Именно вторичные волны ответственны за мелкочаеистую сетку внутри основной ячейки на следовых отпечатках в эксперименте.

Применительно к задаче предотвращения шахтных взрывов создана программа для двумерного численного моделирования многофронтной (ячеистой) детонационной волны в метановоздушной смеси при ее вхождении и последующем распространении по области, представляющей собой пылевое облако из мелкодисперсных инертных частиц. Расчеты для стехиометрической метановоздушной смеси позволили изучить перестройку структуры волны и динамику ее затухания в пылевом облаке, образованном мелкодисперсными частицами SiO_2 . При массовой доле пылевого оксида кремния $\beta = 0.1$ в расчетах получен околокритический режим прохождения волной пылевого облака. При этом режиме сначала происходит плавное затухание детонационной волны, сопровождающееся отсоединением фронта тепловыделения от ведущего ударного фронта, а затем наблюдаются нестационарные процессы распространения волны с мощными поперечными пульсациями. Данные пульсации как раз и могут привести к восстановлению детонации, что подтверждается экспериментальными данными.

Численное моделирование было выполнено на суперкомпьютере МВС-100К Межведомственного суперкомпьютерного центра (МСЦ РАН), Москва. Основные расчеты проведены на 256 сопроцессорах. Продолжительность расчета одного варианта составляла несколько суток суммарного машинного времени. Интенсивность расчетов определялась общей загрузкой суперкомпьютера, максимальное количе-

ство запусков вариантов счета — 2–3 раза в неделю.

Вышесказанное позволяет утверждать, что в настоящее время есть все необходимые предпосылки для создания автоматической системы предотвращения и гашения несанкционированных возгораний метаноугольных смесей в условиях шахт, способной обеспечить эффективное гашение даже такого опасного процесса, как сверхзвуковой режим детонации. Наиболее подходящей для всех операций гашения является начальная стадия возгорания смеси. Дело за официальными структурами и финансированием (в рамках государственно-частного партнерства).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пожаровзрывоопасность** веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в 2 кн. / под ред. А. Н. Баратова, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. — М.: Химия, 1990.
2. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1984.
3. **Андреев К. К., Беляев А. Ф.** Теория взрывчатых веществ — М.: Гостехиздат, 1960.
4. **Химическая энциклопедия:** в 5 т. / под ред. И. Л. Кнунянца. — М.: Сов. энцикл., 1988.
5. **Вредные химические вещества.** Углеводороды. Галогенпроизводные углеводородов: справочник / под ред. В. А. Филова. — Л.: Химия, 1990.
6. **Hertzberg M.** The flammability limits of gases, vapors and dusts: theory and experiment // Fuel — Air Explosions / Lee, Guirao (Eds). — Univ. of Waterloo Press, 1982. — P. 3–48.
7. **Hertzberg M., Cashdollar K. L., Zlochower I. A.** Flammability limit measurements for dusts and gases: ignition energy requirements and pressure dependences // 21th Symp. (Intern.) on Combustion. — 1986. — P. 303–313.
8. **Michels H. J., Munday G., Ubbelohde A. R.** Detonation limits in mixtures of oxygen and homologous hydrocarbons // Proc. Roy. Soc. A:1539. Math. and Phys. Sci. — 1970. — V. 319, N 10. — P. 461–477.
9. **Когарко С. М.** Детонация метановоздушных смесей и пределы детонации углеводородно-воздушных смесей в трубе большого диаметра // Журн. техн. физ. — 1958. — Т. 38, № 9. — С. 2072–2083.
10. **Нетлетон М.** Детонация в газах. — М.: Мир, 1989.
11. **Физика взрыва:** в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко — М.: Физматлит, 2002.
12. **Грачев А. Ю., Новиков А. В., Паневников К. В., Терехов Д. Б.** МФСБ в угольной шахте — позиционирование и оповещение персонала // Вестн. Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — Вып. 2. — С. 121–129.
13. **Васильев А. А., Пинаев А. В., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трубицын А. А., Трубицына Д. А.** Полное подавление волн горения и детонации пылевой завесой // Вестн. Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2015. — № 4. — С. 12–21.
14. **Pinaev A. V., Vasil'ev A. A., Pinaev P. A.** Suppression of gas detonation by a dust cloud at reduced mixture pressures // Shock Waves. — 2015. — V. 25. — P. 267–275. — DOI 10.1007/s00193-014-0543-2.
15. **Федоров А. В., Фомин П. А., Фомин В. М., Тропин Д. А., Чен Дж.-Р.** Физико-математическое моделирование подавления детонации облаками мелких частиц. — Новосибирск: ИТПМ СО РАН, НГАСУ (Сибстрин), 2011.
16. **Trotsyuk A. V., Fomin P. A., Vasil'ev A. A.** Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures // J. Loss Prev. Process Ind. — 2015. — V. 36. — P. 394–403. — DOI 10.1016/j.jlp.2015.03.012.
17. **Троцюк А. В., Васильев А. А., Пинаев А. В.** Численное 2D-моделирование динамики распространения ДВ в запыленной метановоздушной смеси // Вестн. Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — Вып. 2. — С. 82–90.

Поступила в редакцию 20/III 2016 г.