

9. R. J. Eichelberger and G. E. Hauver. "Les Ondes de Detonation, Editions du Centre National de la Recherche". Scientifique. Paris, 1962, p. 363.
10. А. А. Бриш, М. С. Тарасов, В. А. Цукерман. ЖЭТФ, 1959, 37, 1543.
11. Л. В. Альтшулер, Л. В. Кулешова, М. Н. Павловский. ЖЭТФ, 1960, 39, 116.
12. А. Г. Иванов, Е. З. Новицкий, ПМТФ, 1966, 5, 104.

УДК 662.215.4

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЗАРАНЕЕ НЕПОДГОТОВЛЕННЫХ СИСТЕМ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

С. М. Когарко, А. В. Любимов, В. П. Козенко
(Москва)

Многие вещества, находясь в компактном состоянии, горят с трудом, а будучи рассеяны в воздухе в виде пыли, горят очень интенсивно и становятся взрывоопасными [1]. В условиях промышленных предприятий очень часто образуются тонкие слои горючей пыли на различных поверхностях. Эти скопления пыли всегда потенциально взрывоопасны.

Взрывчатая аэрозоль из такого скопления пыли образуется несложно. Это может произойти, например, при движении волны давления в воздухе над поверхностью со слоем горючей пыли на ней [2, 3], причем волна давления, скользящая по слою горючей пыли, может стать причиной не только образования аэрозоли, но и ее воспламенения.

В предлагаемом сообщении представлены результаты исследований по инициированию горения слабыми ударными волнами заранее неподготовленных гетерогенных систем (тонкий слой горючей пыли в атмосфере воздуха). Проводится сопоставление механизмов развития горения со слабыми ударными волнами в гомогенных газовых смесях [4] и в гетерогенных заранее неподготовленных системах. Предлагаемый механизм инициирования горения в гетерогенных системах за слабыми ударными волнами дает возможность объяснить некоторые характерные особенности гетерогенной детонации в системах типа тонкий слой горючей пыли в атмосфере кислорода [3].

В предыдущих работах [5, 6] авторы отмечали характерные особенности поведения порошкообразных материалов в виде тонких слоев при движении в воздухе над слоем слабой ударной волны. Приводились также результаты экспериментальных исследований по воспламенению образующихся при взаимодействии ударной волны со слоем порошка аэрозолей за отраженными ударными волнами. Целью данной работы является дальнейшая разработка динамики развития горения в подобных условиях.

Эксперименты проводились на установке, состоящей из ударной трубы и полутеневого прибора, совмещенного с фоторегистрами ФР-11, ЖФР-2 и СФР-1 в режиме лупы времени. Опыты проводились с древесным и щеточным углем, а также с каменными углями Карагандинского угольного бассейна (пласты K_{12} и K_{18}). Древесный и щеточный уголь имели размер частиц менее 50 мк, карагандинские угли — менее 80 мк. Ударная труба давала возможность получать в наблюдательной камере ударные волны известной амплитуды. Полутеневого прибора,

совмещенный с фоторегистрами, позволял проводить фоторегистрацию процесса инициирования горения в исследуемых гетерогенных системах типа тонкий длинный слой угольной пыли (глубина слоя $\sim 0,5$ мм, длина 30—35 см — из расчета 300 мг пыли на 1 л воздуха при нормальных условиях) на стенке у торца ударной трубы в атмосфере воздуха или смеси кислорода с азотом.

Процесс инициирования и развития горения гетерогенных заранее неподготовленных систем за слабыми ударными волнами в воздухе можно разбить на две стадии: образование горючей аэровзвеси при скольжении фронта ударной волны над слоем угольной пыли на стенке трубы и воспламенение с последующим развитием горения этой обра-

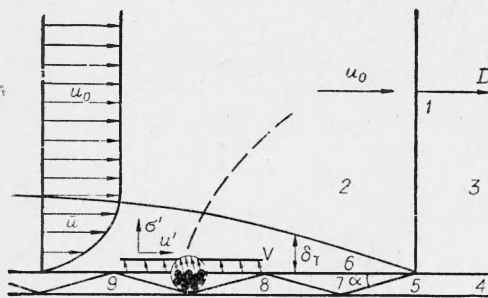


Рис. 1. Схема образования аэровзвеси за фронтом ударной волны, скользящей по поверхности тонкого слоя пыли. (V — скорость подъема частиц в слое пыли в волне разрежения, штриховая линия — траектория движения малой частицы с поверхности слоя в основной поток газа за ударной волной).

1 — ударный фронт; 2 — движущийся со скоростью u_0 газ за ударным фронтом; 3 — газ перед ударным фронтом; 4 — слой пыли; 5 — фронт присоединенной акустической волны сжатия в слое пыли; 6 — турбулентный пограничный слой за ней скорости u по толщине слоя δ_T и пульса-фронтом ударной волны с распределением сред-дционных составляющими u' и v' ; 7 — фронт отраженной волны сжатия; 8, 9 — фронты отражен-ных волн разрежения.

звуча в слое порошка, D — скорость фронта ударной волны).

Газовый поток за фронтом ударной волны образует у поверхности слоя порошка пограничный слой, турбулентный по структуре, так как шероховатости на поверхности слоя имеют порядок 100 мк. При тех характеристиках фронта ударной волны и газового потока за фронтом, которые существуют в исследуемых условиях, частицы пыли менее 10 мк, лежащие непосредственно на поверхности слоя, имеют возможность за время нахождения в области разрежения покинуть слой пыли. Попав в турбулентный пограничный слой, эти частицы аэродинамиче-ски выносятся в основной поток, набирая скорость, почти совпадающую со скоростью потока V_0 .

Эта начальная фаза взаимодействия приводит к образованию дви-жущейся за фронтом ударной волны нагретой аэровзвеси из мелких частиц пыли с малой концентрацией. Полученные результаты совпада-ют с данными из работ [2, 7] о выносе частиц примесей от стенки удар-ной трубы в основной поток газа за фронтом ударной волны.

После этого развивается основная фаза неустойчивости поверхно-

зовавшейся аэровзвеси при отра-жении фронта ударной волны от торца ударной трубы.

Экспериментально установле-но и теоретически объяснено, что при взаимодействии скользя-щей ударной волны в газе с по-верхностью слоя пыли происхо-дит выброс вещества из слоя и образование аэровзвеси [5], при-чем следует отметить две фазы этого процесса.

Развитие неустойчивости по-верхности слоя порошка при скольжении по нему фронта удар-ной волны 1 начинается с образо-вания в слое системы бегущих акустических волн, которые возни-кают от первичной присоединен-ной акустической волны 5 (рис. 1).

В области между фронтами отраженных волн разрежения (см. рис. 1, 8, 9) в слое частицы порошка приобретают почти вер-тикальную скорость V (угол $\alpha = \arcsin \frac{c}{D}$, где c — скорость

сти слоя пыли за фронтом ударной волны из-за раскочки начальных возмущений в слое при наличии интенсивного газового потока. Особенно отчетливо можно наблюдать эту фазу в покоящемся газе в случае отражения ударной волны от торца ударной трубы [5]. Происходит выброс всей массы пыли из слоя в покоящийся горячий газ за фронтом отраженной ударной волны со скоростью порядка 10 м/сек (в исследуемых системах).

Образующаяся аэровзвесь неоднородна по концентрации и дисперсности. Как показал расчет, прогрев частиц пыли в аэровзвеси не приводит к заметному снижению температуры газа у торца ударной трубы. Последующее развитие процесса определяется интенсивностью ударной волны в воздухе.

Экспериментально показано, что выбранные гетерогенные заранее неперемешанные системы сравнительно легко воспламеняются за отраженными ударными волнами. Воспламенение происходит с определенной задержкой относительно момента отражения фронта ударной волны и имеет очаговый характер. В зависимости от интенсивности ударной волны наблюдаются три варианта развития горения из образующегося очага воспламенения (рис. 2).

Сравнительно сильные ударные волны (для системы древесный уголь и воздух числа Маха выше 3,2) инициируют при отражении режим горения гетерогенной системы, ведущийся фронтом отраженной ударной волны. Воспламенение наблюдается на определенном расстоянии от торца ударной трубы, когда фронт отраженной ударной волны встречает облако движущихся мелких угольных частиц, возникшее на начальной стадии развития неустойчивости поверхности слоя угольной пыли (см. рис. 2, а, б, в). Этот объемный очаг приводит к формированию зоны горения угольных частиц за фронтом отраженной ударной волны и области догорания угольных частиц у торца ударной трубы после ухода фронта отраженной ударной волны.

Ударные волны меньшей интенсивности (для древесного угля в воздухе числа Маха от 2,6 до 3,2) инициируют при отражении горение угольных частиц со значительной задержкой воспламенения (500—1000 мксек). Воспламенение имеет очаговый характер; очаг возникает в покоящемся газе на некотором расстоянии от торца ударной трубы (это расстояние в исследуемых случаях составляет 5—7 см) после ухода фронта отраженной ударной волны. Возникший очаг служит источником развития горения в образующейся аэровзвеси. Скорость перемещения зоны горения на начальном участке составляет 1 : 3 м/сек (см. рис. 2, г). Процесс горения ведется теплопередачей, причем существенную роль в углевоздушной системе играет лучистая теплопередача.

Последующее ускорение движения зоны горения, которое в ряде случаев наблюдается через времена 1,5—2 мсек после отражения фронта ударной волны от торца,— это увеличение видимой скорости движения зоны горения. За указанные промежутки времени к торцу ударной трубы из-за газодинамических взаимодействий течений в ударной трубе приходит слабая волна разрежения. Движущийся газ в волне разрежения увлекает в движение угольные частицы, что приводит к возрастанию видимой скорости горения до значений 30 : 50 м/сек. Проведенный расчет скорости угольных частиц, попавших в волну разрежения, показал, что частицы в исследуемых условиях действительно имеют скорости порядка 30 : 50 м/сек.

Как и для случая сравнительно сильных ударных волн, в указанных условиях у торца ударной трубы наблюдается продолжительное

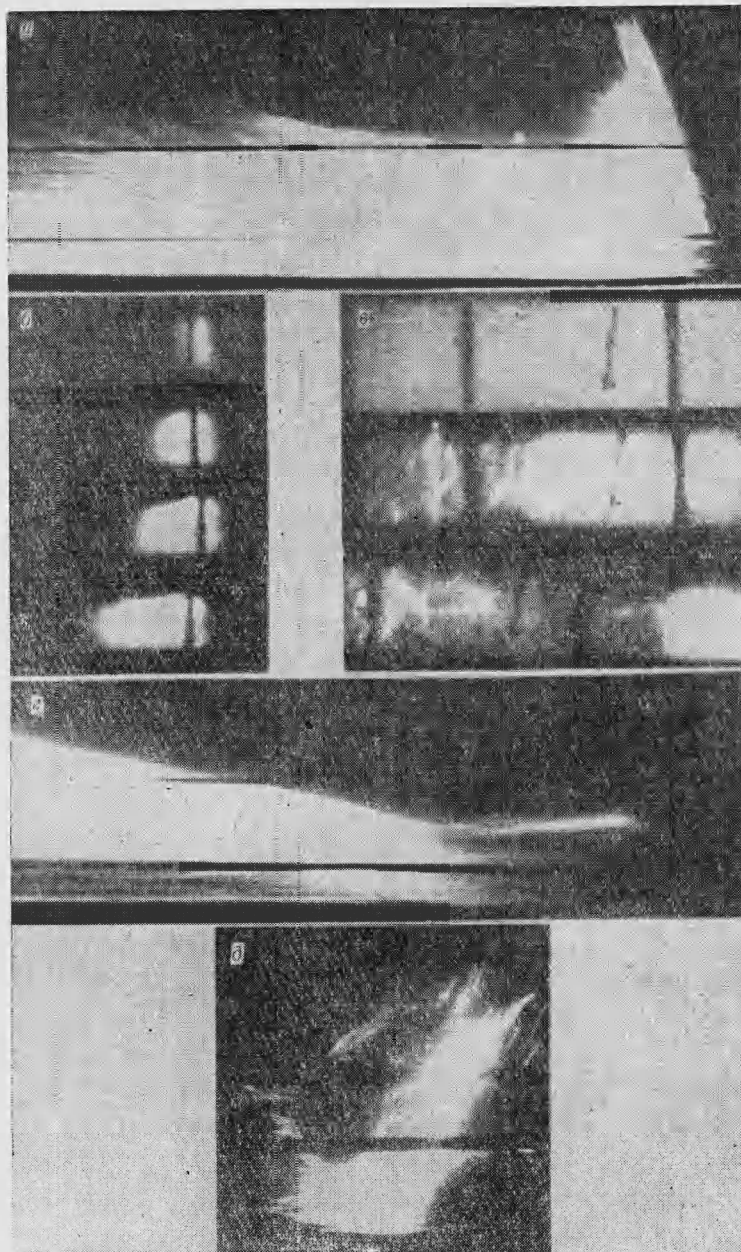


Рис. 2. Иницирование горения углевоздушных заранее неподготовленных систем за отраженными ударными волнами в ударной трубе.

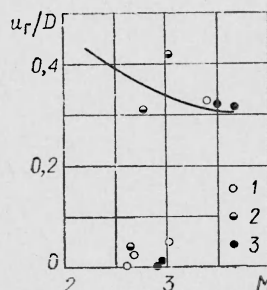
a — фоторазвертка самосвечения режима горения, ведущегося фронтом отраженной ударной волны, сделанная сверху через узкую щель, $M=3,4$; *б* — кадры скоростной киносъемки самосвечения режима *a*, снятые через боковое окно; *в* — кадры скоростной полутеневой киносъемки режима *a*, снятые через боковое окно; *г* — фоторазвертка самосвечения режима горения, развивающегося в покоящемся газе после ухода фронта отраженной ударной волны, сделанная через узкую щель сверху, $M=2,6$; *д* — фоторазвертка самосвечения очага, возникающего у торца ударной трубы, $M=2,5$.

догорание угольных частиц в аэрозвеси. Ударные волны с числами Маха меньше чем 2,6 инициируют при отражении в системе древесный уголь — воздух слабую вспышку в области, прилегающей к торцу ударной трубы. Интенсивность возникшего очага в области за фронтом отраженной ударной волны в этом случае недостаточна для того, чтобы началось развитие горения (см. рис. 2, д).

Полученные результаты по возможным вариантам инициирования горения заранее неподготовленных углевоздушных систем за отраженными ударными волнами обобщены на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость отношения скорости движения зоны горения за отраженной ударной волной u_r к скорости фронта ударной волны D от числа Маха падающей ударной волны M для горения систем: тонкий длинный слой угольной пыли на стенке ударной трубы в атмосфере воздуха или смеси азота с кислородом при начальном давлении 0,3 атм.

1 — древесный уголь — воздух; 2 — древесный уголь — смесь кислорода с азотом (47% O_2); 3 — карагандинский каменный уголь (пласт K_{12}) — воздух. Размер частиц древесного угля менее 50 мк, каменного угля — менее 80 мк. Кривая — экспериментальная зависимость $u_{отр}/u_c$ для отражения ударной волны в чистом воздухе без пыли на стенках трубы.



Режимы горения, ведущиеся фронтом отраженной ударной волны, не дают заметного увеличения скорости фронта отраженной ударной волны, по-видимому, из-за очень малого энерговыделения в зоне, непосредственно прилегающей к ведущему фронту отраженной ударной волны. Это объясняется сравнительно небольшими скоростями горения угольных частиц, горящих с поверхности и сгорающих за большие времена [8].

Обогащение воздуха кислородом приводит к заметному сдвигу экспериментальных точек влево, что связано с улучшением условий воспламенения и развития горения в системах. Промышленные угольные пыли, например угольная пыль из пласта K_{12} Карагандинского угольного бассейна, имеют худшие характеристики по воспламенению и горению за отраженными ударными волнами в ударной трубе по сравнению с древесным углем.

В опытах с углевоздушными системами, а также в случае незначительного обогащения воздуха кислородом не наблюдалось интенсивного увеличения скорости движения зоны горения, подобного ускорению горения в гомогенных газовых смесях за отраженными ударными волнами. Однако в случае сильного обогащения воздуха кислородом при интенсивности волны, недостаточной, чтобы повести за собой режим горения (число Маха 2,9), можно наблюдать, как горение, возникнув из очага, ускоряется за небольшой интервал времени до 200 : 250 м/сек. Особенности поведения гетерогенной системы в случае использования в качестве окислителя смесей с повышенным содержанием кислорода отражены на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Фоторазвертка самосвечения ускоряющегося режима горения, развивающегося из очага в системе древесный уголь — смесь кислорода с азотом (61% O_2). Начальное давление 0,3 атм. $M=2,9$.

Результаты, полученные при

