

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1967.
2. Н. Н. Семенов. УФН, 1940, 23, 3.
3. Д. А. Франк-Каменецкий. ЖФХ, 1946, 20, 2.
4. В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтовская и др. ПМТФ, 1964, 3.
5. А. Г. Мержанов, Е. Г. Зеликман, В. Г. Абрамов. Докл. АН СССР, 1968, 180, 3.
6. И. С. Любченко. Докл. АН СССР, 1977, 235, 6.
7. А. Д. Марголин. ЖФХ, 1963, 37, 4.
8. С. А. Бостанджиян, А. Г. Мержаиов, Н. М. Пручкина. ПМТФ, 1968, 5.
9. А. М. Столин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 4.
10. И. Г. Дик. ФГВ, 1976, 12, 1.
11. А. М. Столин. ФГВ, 1975, 11, 3.
12. П. В. Жирков, В. И. Боярченко, С. А. Бостанджиян.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1977.
13. В. Н. Вилюнов, И. Г. Дик. ФГВ, 1978, 14, 3.
14. А. Г. Мержанов, Ю. А. Гальченко и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
15. В. Н. Вилюнов, Е. А. Некрасов, И. Г. Дик. ФГВ, 1978, 14, 2.
16. В. Б. Улыбин, С. А. Кочетов и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1977.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ НАД СЛОЕМ ПОРОШКА МЕТАЛЛА

*В. Н. Бринза, И. В. Бабайцев, С. Т. Папаев*

*(Москва)*

В процессе получения и переработки металлических порошков могут возникать условия, при которых эти материалы воспламеняются, а их аэрозвеси взрываются. Известны крупные производственные аварии в результате взрывов алюминиевого, магниевое, титанового порошков в мельница, бункерах, системах газоочистки, вентиляционных установках, а также взрывов осевшей пыли в производственных помещениях [1]. Поэтому актуальность проблемы пожаро- и взрывобезопасности металлических порошков очевидна.

Имеющиеся публикации по данной проблеме посвящены главным образом исследованию параметров, характеризующих возникновение начального очага горения (температура самовоспламенения и воспламенения, нижний концентрационный предел воспламенения, минимальная энергия воспламенения, минимальное взрывоопасное содержание кислорода в смеси и т. д.), вопросы же перехода горения во взрыв и детонацию практически не изучены, хотя возможность детонации аэрозвесей металлических порошков доказана экспериментально [2].

Кроме того, оценка взрывоопасности металлических порошков проводилась для заранее подготовленной газодисперсной системы, хотя результаты замеров, проведенных в производственных условиях, показывают, что взрывоопасные концентрации образуются, как правило, в ограниченном объеме (например, непосредственно в потоке пересыпаемого материала) и уже на расстоянии 10—15 см от источника пыления на порядок меньше нижнего концентрационного предела воспламенения [3]. Однако имевшие место разрушительные взрывы свидетельствуют о том, что вовлечение во взрывной процесс большого количества материала связано с переходом во взвешенное состояние и взрывным горением осевшей горючей пыли. Этот процесс для порошков металлов до настоящего вре-

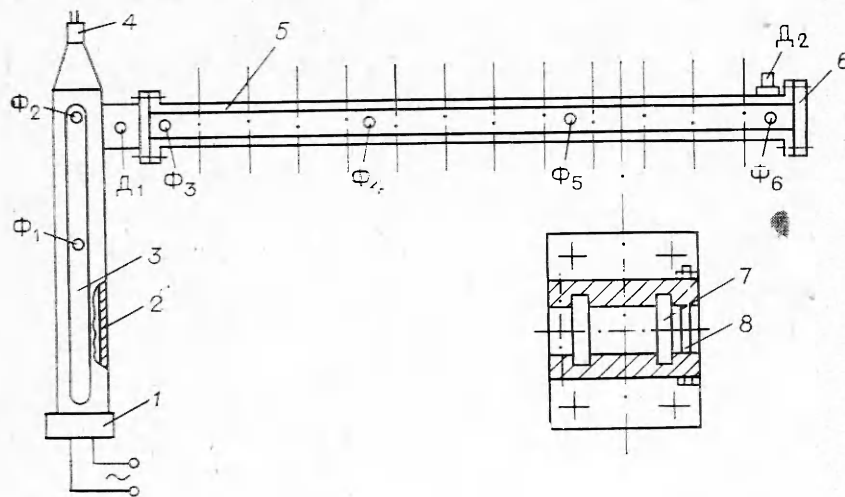


Рис. 1. Схема установки для исследования распространения взрывного горения над слоем порошка металла.

1 — воспламенитель; 2 — металлическая труба; 3 — смотровые окна; 4 — распылитель; 5 — металлическая пластина; 6 — крышка; 7 — плексигласовые полосы; 8 — соединительные болты.

мени практически не исследовался. Известны лишь отдельные работы по изучению горения металлических порошков в отраженной ударной волне [4, 5], получаемой при взрыве горючей газовой смеси. Такие условия далеки от реальных: при возникновении вторичных пылевых взрывов переход во взвешенное состояние и горение металлической пыли происходит под действием локальных взрывов аэрозвесей тех же порошков, причем параметры пылевых и газовых взрывов существенно отличаются от скорости распространения взрыва, максимального давления взрыва, скорости его нарастания и т. д.

На кафедре охраны труда Московского института стали и сплавов разработана методика и изготовлена установка, позволяющая моделировать условия возникновения и развития взрывов над слоем осевшего порошка (например, возможность распространения взрывных процессов над слоем осевшей металлической пыли в воздухопроводах вентиляционных систем при локальном воспламенении аэрозвеси вблизи вентилятора). Установка для изучения возможности и скорости распространения взрывного горения над слоем порошка металла (рис. 1) состоит из узла создания первичного импульса и реакционной камеры, разделенных между собой мембраной. Узел создания первичного импульса — это вертикальная металлическая труба 2 диаметром 100 и длиной 1200 мм, оборудованная смотровыми окнами 3 и синхронно работающими устройствами для создания аэрозвеси порошка 4 и ее воспламенения 1, расположенными соответственно в верхней и нижней части трубы. Реакционная камера представляет собой сборную трубу прямоугольного сечения длиной 2000 мм, ширина рабочего пространства 40 мм, высота ( $h$ ) меняется в пределах 10—40 мм путем замены плексигласовых полос 7.

Установка работает следующим образом. В реакционной камере равномерно распределяется слой исследуемого металлического порошка определенной толщины ( $\delta$ ), а в вертикальной трубе воспламеняется заранее созданная аэрозвесь такого же материала. При развитии взрыва вследствие нарастания давления происходит прорыв мембраны и горячие продукты первичного взрыва истекают в реакционную камеру. При прохождении ударной волны над слоем порошка последний переходит во взвесь и, двигаясь за фронтом, воспламеняется за счет высокой температуры потока.

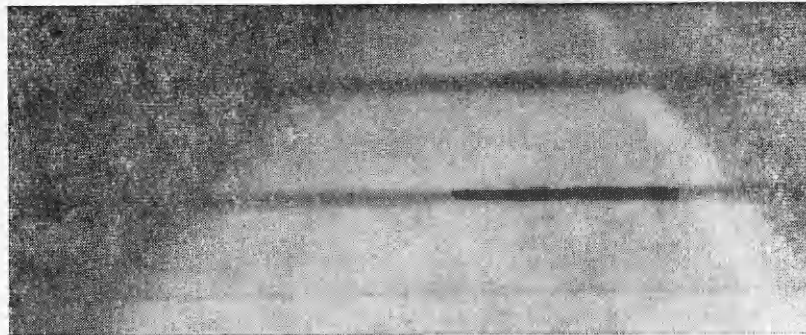


Рис. 2. Характерная регистрограмма распространения взрывного горения над слоем порошка ПАМ-4 (размер частиц  $d < 50$  мкм, толщина слоя  $\delta = 0,1$  мм, давление прорыва мембраны  $\Delta p = 4,15$  кг/см<sup>2</sup>, высота реакционной камеры  $h = 10$  мм, участок съемки 145–170 см от мембраны, скорость распространения пламени  $u = 616$  м/с).

Развитие процесса фиксируется по показаниям двух индуктивных датчиков давления  $D_1$  и  $D_2$  типа ДД-10 через индикатор давления ИД-2И и шести фотоэлементов  $\Phi_1 - \Phi_6$  типа ФЭСС-У10 (см. рис. 1), а также с помощью киносъемки с использованием высокоскоростной кинокамеры СКС-1м и ждущего фоторегистратора ЖФР-3. Типичные осциллограмма и регистрограмма приведены на рис. 2, 3.

Для исследования выбран порошок ПАМ-4 с размером частиц менее 50 мкм, отличающийся высокой взрывоопасностью (относительно небольшая температура воспламенения и невысокий нижний концентрационный предел воспламенения) при низком удельном весе материала, что способствует его переходу во взвешенное состояние.

Эксперименты, проведенные с данным материалом, свидетельствуют об активном участии осевшего металлического порошка во взрывном горении (рис. 4). На начальном этапе скорость горения определяется характеристиками первичного взрыва, а в последующем — зависит от условий эксперимента. Во всех случаях при отсутствии в реакционной камере порошка происходит уменьшение скорости распространения светящихся продуктов первичного взрыва после прорыва мембраны, что связано с падением давления в вертикальной камере вследствие истечения продуктов взрыва в свободный объем. При наличии в камере слоя металлического порошка картина резко изменяется: в определенных условиях горение происходит с ускорением. В проведенных экспериментах давление во фронте ударной волны  $p_{ув}$  не превышает 7 кг/см<sup>2</sup>, расчетная температура во фронте менее 300°C, что значительно ниже температуры воспламенения аэровзвесей порошка ПАМ-4, равной 520°C.

Таким образом, порошок, переходящий во взвесь после прохождения волны, подогревается, а затем воспламеняется от горячих продуктов первичного взрыва и выделяющаяся при этом энергия в свою очередь поддерживает ударную волну. В то же время при увеличении давления во фронте волны интенсифицируется процесс перехода порошка во взвешенное состояние и возрастает турбулентность

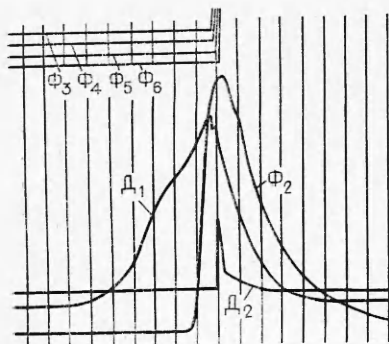


Рис. 3. Осциллограмма изменения давления и распространения горения над слоем порошка ПАМ-4 ( $d < 50$  мкм,  $\delta = 0,1$  мм,  $\Delta p = 5,7$  кг/см<sup>2</sup>, конечное давление во фронте ударной волны 6,0 кг/см<sup>2</sup>,  $h = 40$  мм).

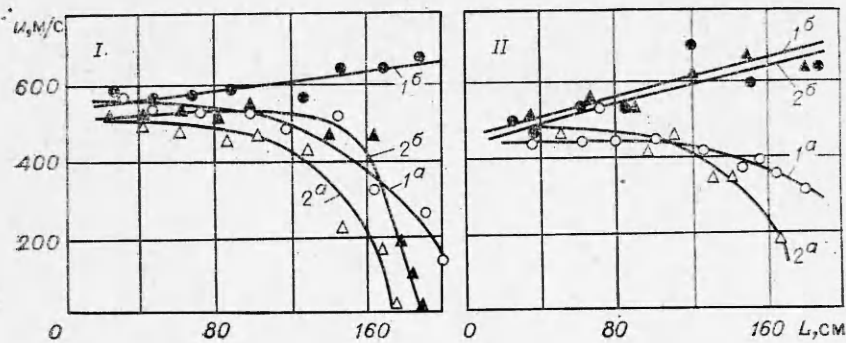


Рис. 4. Зависимость скорости распространения фронта пламени в открытой (I) и герметичной (2) реакционной камере от расстояния. а) порошка нет; б) толщина слоя порошка ПАМ-4 с  $d < 50$  мкм — 0,1 мм. I —  $h = 40$  мм,  $s = 16$  см<sup>2</sup>; II —  $h = 10$  мм,  $s = 4$  см<sup>2</sup>.

потока аэровзвеси, что и объясняет нарастание скорости взрывных процессов, распространяющихся над слоем порошка. Расстояние между фронтом пламени и фронтом ударной волны колеблется от 20 до 40 см, что соответствует времени отставания 0,0004—0,0006 с. Если принять среднюю скорость подъема порошка за фронтом 10 м/с (средняя скорость подъема порошка ПАМ-4 с  $d < 50$  мкм при  $p_{ув} = 3$  кг/см<sup>2</sup> составляет 5—7 м/с) при  $p_{ув} \approx 5-6$  кг/см<sup>2</sup>, то к моменту подхода пламени высота аэровзвеси составит 4—6 мм. Поэтому с увеличением  $h$  с 10 до 40 мм наблюдается более медленное нарастание скорости взрывных процессов над слоем, что связано с большим объемом свободного пространства. На скорость распространения пламени на начальном этапе, кроме характеристик первичного взрыва, определяющих  $p_{ув}$ , оказывает влияние размер отверстия, через которое истекают продукты взрыва. С увеличением площади выходного отверстия  $s$  скорость истечения возрастает.

На характер развития процесса оказывает влияние также герметичность реакционной камеры (открыт или закрыт торец камеры). При этом в камерах малой высоты это влияние незначительно в отличие от камер большего размера, в которых в случае закрытого торца на конечном участке происходит снижение скорости горения как при отсутствии в камере порошка, так и при его наличии. Это связано с тем, что встречная ударная волна, отраженная от торцевой стенки, резко снижает массовую скорость движения дисперсной системы и соответственно скорость распространения фронта пламени. В случае закрытых камер малого размера, по-видимому, за счет более быстрого торможения отраженной волны это влияние меньше. Увеличение толщины слоя порошка от 0,1 до 4,0 мм приводит к небольшому снижению скорости распространения взрыва над слоем, зависящей от скорости ударной волны. Даже при  $\delta = 4,0$  мм ( $h = 40$  мм) процесс горения идет с ускорением. Это объясняется тем, что во взвесь переходит не весь порошок, а только его верхний слой. Поэтому концентрация аэровзвеси к моменту воспламенения не достигает верхнего концентрационного предела. Анализ продуктов взрыва это подтверждает.

22/XI 1978 Поступила в редакцию

#### ЛИТЕРАТУРА

1. K. N. Palmer. Dust explosion and fires. London, Chapman and Hall, 1973.
2. W. A. Strauss. AIAA J., 1968, 6, 9, 1953.
3. И. В. Бабайцев, А. И. Белкин, Н. Н. Карнаух. Проблемы инженерной охраны труда. М., Металлургия, 1977, № 105.
4. А. Б. Рыжик, Ю. А. Юрманов, Б. С. Лимонов. Тр. Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института алюминиевой, магниевой и электродной промышленности, № 87, 1974.
5. Г. В. Калабухов, А. Б. Рыжик, Ю. А. Юрманов.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.