

ВЗРЫВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЫЛИ

А.С. Опарин, Ф.К. Буланин, А.Е. Сидоров, Н.И. Полетаев, В.Г. Шевчук

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Институт горения и нетрадиционных технологий,
65082 Одесса, Украина

Дата поступления:
4 Апреля 2019

Принято на печать:
24 Мая 2019

Доступно онлайн:
6 Июля 2019

УДК: 536.46

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований зависимости максимального давления ($P_{\max}$) и максимальной скорости нарастания давления взрыва $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ от дисперсных характеристик алюминиевой пыли. Исследования проводились для взвесей алюминиевых порошков АСД-1 и АСД-4, а также их смесей в различных массовых соотношениях с целью выявления влияния удельной поверхности пылей на их взрывные характеристики. Для проведения исследований применена модифицированная установка по определению взрывных характеристик горючих взвесей объемом 4 л. В результате исследований и сопоставления с результатами имеющихся в литературе данных выявлено, что максимальное давление взрыва слабо зависит от дисперсности и существенно зависит от концентрации горючего, а максимальная скорость нарастания давления, существенно зависит от концентрации, дисперсности пыли и начального уровня турбулентности, достигая наибольших значений при концентрациях, в несколько раз превосходящих стехиометрические.

Ключевые слова: аэровзвеси, алюминий, максимальное давление взрыва, максимальная скорость нарастания давления.

Введение

В соответствии с нормативными требованиями [1] одними из наиболее важных показателей пожаро-взрывобезопасности пыли являются максимальное давление $P_{\max}$ и максимальная скорость нарастания давления $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ взрыва. Экспериментально эти характеристики определяются в стандартных условиях – герметичных взрывных камерах различного объема по методикам, представленным в [2, 7]. Принцип измерения заключается в предварительном распылении исходного порошка в заданный объем, его зажигания и измерении зависимости давления от времени $P(t)$. Естественно, что указанные характеристики могут быть представительными только при соблюдении необходимых условий. Прежде всего, необходимо добиться контролируемого распыления исходного порошка, т.е. получения равномерно запыленной и дезагрегированной дисперсной среды. Важность выполнения этих условий очевидна. В случае неравномерного запыления в объеме могут возникать локальные как максимумы (выше верхнего концентрационного предела распространения пламени), так и минимумы (ниже нижнего концентрационного предела распространения пламени) концентрации горючего вещества.

Вследствие этого воспламенение может либо вовсе не происходить, либо результаты измерений не будут соответствовать заявленным концентрациям. Что касается дезагрегации, то в случае ее недостаточности, отдельные частицы исследуемого вещества могут объединяться в агломераты, что в корне меняет его свойства, поскольку взрывные характеристики сильно зависят от размера частиц. Например, в работе [3] приведены результаты исследования $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ в зависимости от концентрации горючего для нанодисперсных пылей частиц алюминия, из которых следует, что для частиц размером 35, 75 и 100 нм эта величина практически не зависит от размера. Физически это невозможно объяснить ничем иным, кроме как существенной агломерацией исходного порошка, вследствие чего практически получаемая дисперсная среда является газозвесью случайно образованных агломератов. Более того, пневматическим способом дезагрегировать пыль с размером частиц менее 1 мкм практически невозможно [4].

Отметим еще одно обстоятельство, взяв в качестве примера алюминиевые пыли, что обусловлено их широким применением в современных технологиях, особенно в ракетных топливах. Имеется достаточно много сведений о концентрационных пределах, скоростях распространения пламени, взрывных

характеристиках алюминиевой пыли [4-11]. Однако, зачастую, наблюдается существенный разброс приведенных данных, даже при близких значениях дисперсности и концентрации пыли, что обусловлено значительным отличием условий проведения опытов.

Так в работе [6] проведены очень обширные экспериментальные исследования по влиянию на $P_{\max}$ и $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ концентрации, размера частиц, дисперсии функции распределения частиц по размерам в очень широком диапазоне параметров. Опыты проводились в полусферическом сосуде объемом 36 л по стандарту ASTM, E-1226-05 [7], время задержки зажигания 25 мс, диапазон концентраций $\sim 100 \div 1500 \text{ г/м}^3$. $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ изменялось от $\sim 10 \text{ МПа/с}$ для сравнительно крупнодисперсных частиц ($d \sim 17,34 \text{ мкм}$) до 250 МПа/с для мелкодисперсных частиц ($d \sim 1 \text{ мкм}$). Режим распространения пламени по пыли – турбулентный.

Подобные исследования [8] выполнялись в 20 л сферическом сосуде по стандарту ISO 6184-1, время задержки воспламенения 60 мс. $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ для мелкодисперсных порошков ($d_{20} \sim 1 \text{ мкм}$; 8,6 мкм) менялось от 15 МПа/с до 250 МПа/с для крупнодисперсных порошков ($d_{20} \sim 17$; 22; 27; 34 мкм) от $\sim 2 \text{ МПа/с}$ до 15 МПа/с при изменении концентрации от ~ 30 до $\sim 1000 \text{ г/м}^3$. Режим распространения пламени по данным измеренных средних видимых скоростей распространения пламени – турбулентный (по крайней мере для мелкодисперсных порошков).

Аналогичные данные в диапазоне концентраций до $\sim 3000 \text{ г/м}^3$ для порошков $d_{50} \sim 7$; 11; 27; 42 мкм в таких же экспериментальных условиях получены в работе [9]. Сходные результаты также приведены в работе [10].

Наконец, в работе [11] в цилиндрическом сосуде объемом 20 л проведены целенаправленные исследования по влиянию начального уровня турбулентности в пылевом облаке алюминиевых частиц диаметром $d_{32} = 3,24$ и 9,09 мкм на реализуемые значения $P_{\max}$ и $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$. Для $d_{32} = 9,09 \text{ мкм}$ $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ изменяется от $\sim 4 \text{ МПа/с}$ до $\sim 10 \text{ МПа/с}$ при увеличении уровня турбулентности в 6 раз. Для $d_{32} = 3,24 \text{ мкм}$ от $\sim 5 \text{ МПа/с}$ до $\sim 70 \text{ МПа/с}$, то есть более, чем на порядок.

Кратко резюмируя эти исследования отметим, что дисперсные характеристики исходных

порошков оказывают решающее воздействие на взрывные характеристики пыли. Причем $P_{\max}$ являющееся термодинамической характеристикой пыли, влияние дисперсности сказывается в пределах $\sim 30\%$ измерения, в то время как $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$, являющаяся динамической характеристикой, зависящей от режима распространения пламени по пыли, это влияние изменяется на порядки.

Что касается теоретических исследований, укажем, что экстремальные характеристики взрываемости пылей, частицы которых реагируют в кинетическом режиме изучались в [6], в диффузионном режиме в [7]. Под экстремальностью подразумеваются условия адиабатичности и одновременного протекания процесса во всем объеме (режим теплового взрыва).

Настоящая работа преследует две цели. Во-первых, экспериментально изучить, в какой мере согласуются между собой данные по взрывным характеристикам, получаемым по различным методикам. Для этого в наших исследованиях использовался взрывной цилиндр ВНИИПО [2] объемом 4 л, а полученные данные сопоставляли с таковыми, полученными в рассмотренных выше работах. Во-вторых, систематически исследовать влияние дисперсных характеристик порошков на реализуемые значения $P_{\max}$ и $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$. В качестве базовых порошков выбраны АСД-1 и АСД-4, дисперсные характеристики которых приведены в таблице. Также исследовались их смеси в различных массовых соотношениях, что позволило целенаправленно изменять удельную реакционную поверхность.

Для смесевых составов Γ_{32} можно определить как $\frac{1}{\Gamma_{32}} = \frac{\alpha_1}{\Gamma_{32}^{(1)}} + \frac{\alpha_2}{\Gamma_{32}^{(2)}}$, где α_i – весовые доли исходных порошков в смеси.

Экспериментальные исследования

Предварительно изучалось «качество» распыления на прозрачной камере-модели взрывного цилиндра ВНИИПО. Напомним, что в стандартной установке использовалась система распыла расположенная в верхней части, а система поджига (накаленная спираль) расположена у дна цилиндра. Распыл производился из стандартного питателя с заданными характеристиками и фиксировался скоростной видеокамерой (~ 300 кадров/с). Опыты показали, что в данных условиях ни о каком равно-

Таблица 1

Среднестатистические радиусы частиц исходных порошков алюминия

Марка порошка	Γ_{10} , мкм	Γ_{20} , мкм	Γ_{30} , мкм	Γ_{32} , мкм
АСД-1	7,26	8,38	9,46	12,06
АСД-4	2,38	2,66	3,1	4,21

мерном запылении (использовались порошки алюминия АСД-1 и АСД-4) не может идти и речи – часть порошка сыпалась по стенкам камеры, а часть, в виде плотного сгустка, достаточно быстро опускалась на дно. При этом судить о степени дезагрегации и степени начальной турбулентности в облаке невозможно.

Поэтому методика была модифицирована, прежде всего, за счет систем распыла и поджига. В модифицированной установке, схематическое изображение которой приведено на Рис. 1, система распыла (6) перенесена вниз, однако более важным является устройство распылительной форсунки (Рис. 2), особенность строения которой позволяет регулировать зазор между направляющим конусом (5) и конусом (4), через который происходит распыление порошка (1) высокоскоростными струями воздуха (или другого газа), благодаря чему можно добиться необходимого уровня дезагрегации порошка.

Система поджига (20) перемещена в центральную часть и представляет собой два электрода с контролируемой длиной. К ним возможно подключение как искрового генератора, способного создавать постоянный или импульсный искровой разряд заданной мощности, так и разовые воспламенители (сгорающие металлические проволочки, пиротехнические заряды). Параметры распыла (давление, длительность пневмоимпульса) и зажигания (вид, мощность, длительность и время задержки) подбираются эмпирически по данным видеосъемки в камере-модели и соответствуют наиболее полному объемному запылению и затуханию пульсаций, обусловленных пневмоимпульсным способом создания облака. Динамику распыла передает видеограмма на Рис. 3. О равномерности запыления рабочего объема и степени дезагрегации судили качественно, исходя из видеограмм и микроскопического анализа слоя порошка, осевшего на предметное стекло, помещенное на дно сосуда. Так что речь идет о средней концентрации, рассчитанной по массе порошка и объему сосуда.

В ходе проведения экспериментов с тензодатчика (11) снимались показания напряжений, которые затем, согласно предварительно проведенной градуировке, переводились в значения давления (использовался тензодатчик КФ 5П1-10-100-5-Б-12). Типичная зависимость $P(t)$ приведена на Рис. 4. Время задержки зажигания после распыления составляло менее 0,3 с, что позволяет пренебречь оседанием порошка за предвоспламенительный период и, что более важно, что турбулентность, обусловленная пневмоимпульсным способом создания пыли, успевает затухать.

Опыты проводились с исходными порошками алюминия АСД-1 и АСД-4 и их смесями в соотношении по массе (АСД-1/АСД-4) 80/20, 60/40, 40/60 и 20/80. Такой подход позволил целенаправленно из-

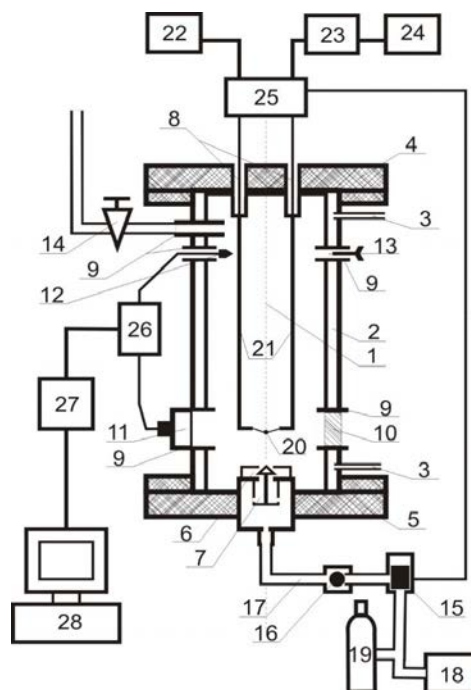


Рис. 1. Схема модифицированной установки: 1 – реактор; 2 – водяная рубашка; 3 – патрубки ввода\вывода охлаждающей жидкости; 4 – верхняя съемная фланцевая заглушка; 5 – нижняя съемная фланцевая заглушка; 6 – форсунка; 7 – навеска порошкообразного горючего; 8 – герметизированные электропроводы для электродов; 9 – радиальные фланцы и патрубки; 10 – герметизированное окно; 11 – тензодатчик; 12 – термопара; 13 – предохранительный клапан; 14 – выпускной клапан; 15 – электромагнитный клапан; 16 – обратный клапан; 17 – газовая магистраль; 18 – компрессор; 19 – баллон со сжатым газом; 20 – одноразовый воспламенитель; 21 – электроды системы зажигания; 22 – аккумуляторная батарея; 23 – катушка зажигания; 24 – регулируемый источник напряжения; 25 – цифровой блок управления распылом и поджигом; 26 – усилитель сигналов; 27 – аналогово-цифровой преобразователь; 28 – персональный компьютер.

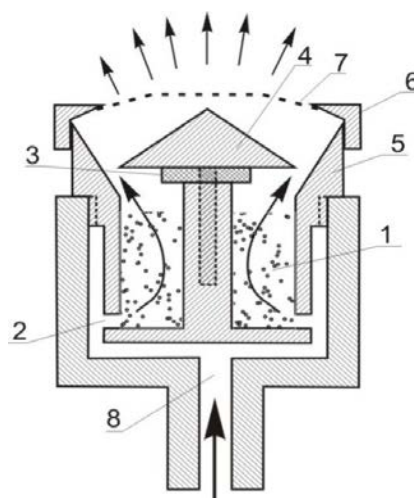


Рис. 2. Конструкция распылителя: 1 – вихревая камера с порошком; 2 – тангенциальные отверстия; 3 – регулировочные шайбы; 4 – конус-нож; 5 – направляющий конус вихревой камеры; 6 – отбойная насадка; 7 – сетка.

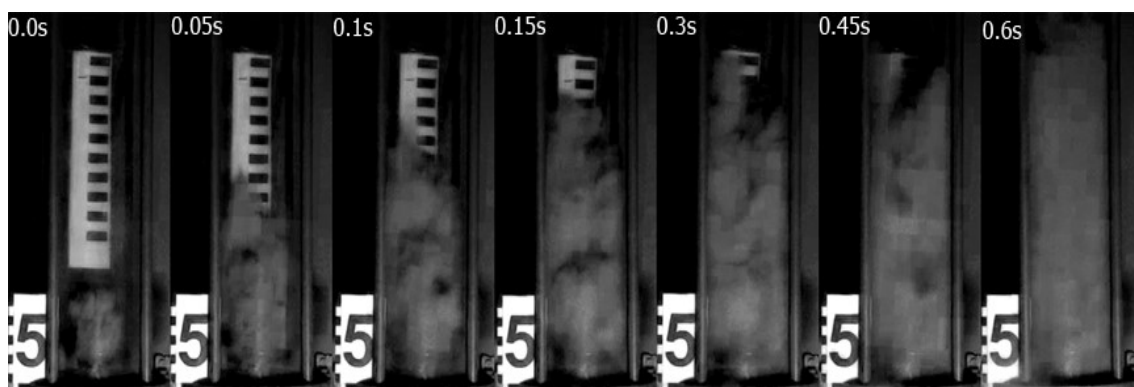


Рис. 3. Видеограмма процесса запыления. АСД-4, $B = 400 \text{ г/м}^3$, скорость съемки 300 кадров/с.

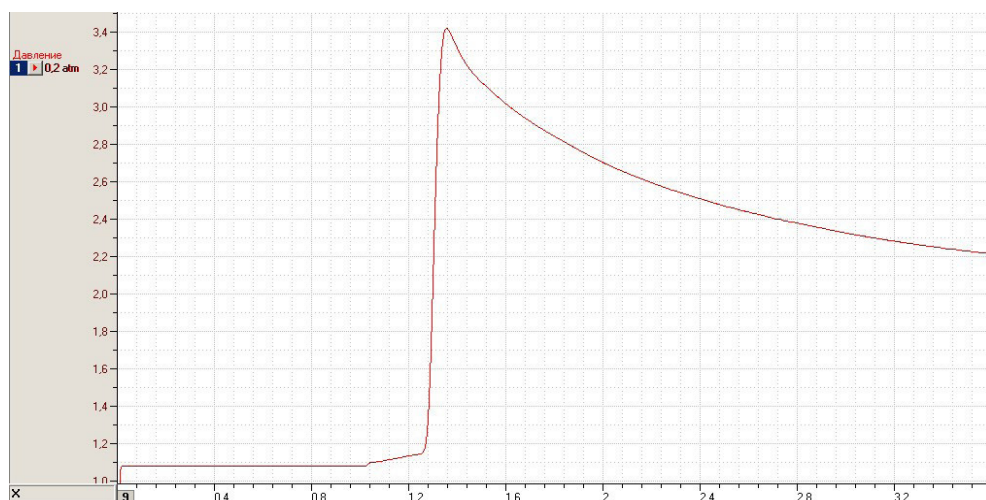


Рис. 4. Типичная зависимость давления от времени, снимаемая с тензодатчика в процессе взрыва (для АСД-1).

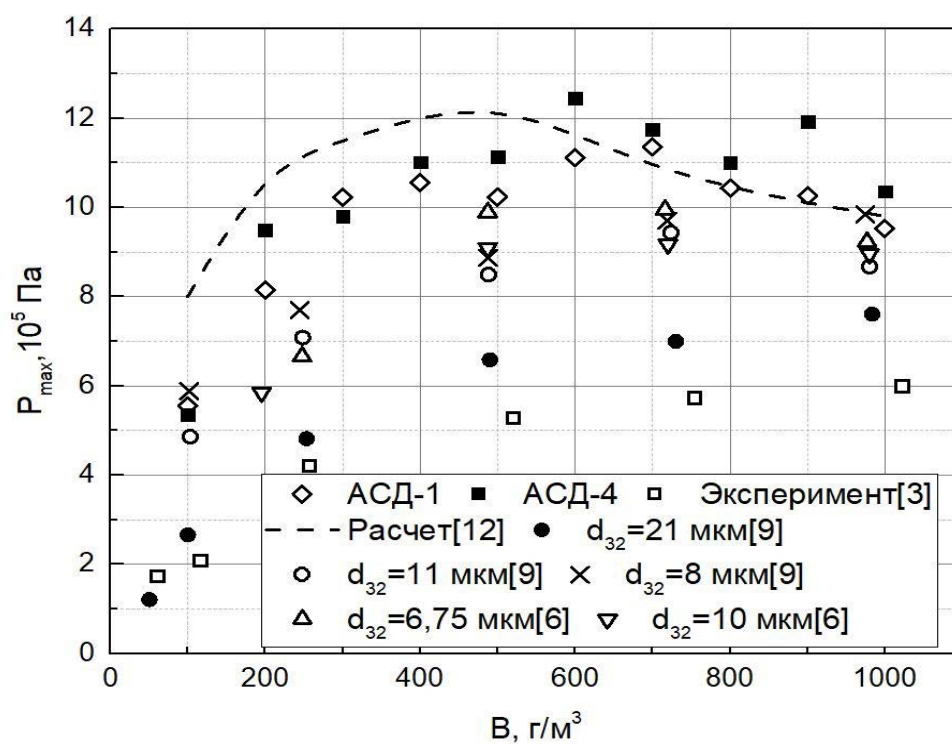


Рис. 5. Зависимость максимального давления взрыва от концентрации горючего порошка.

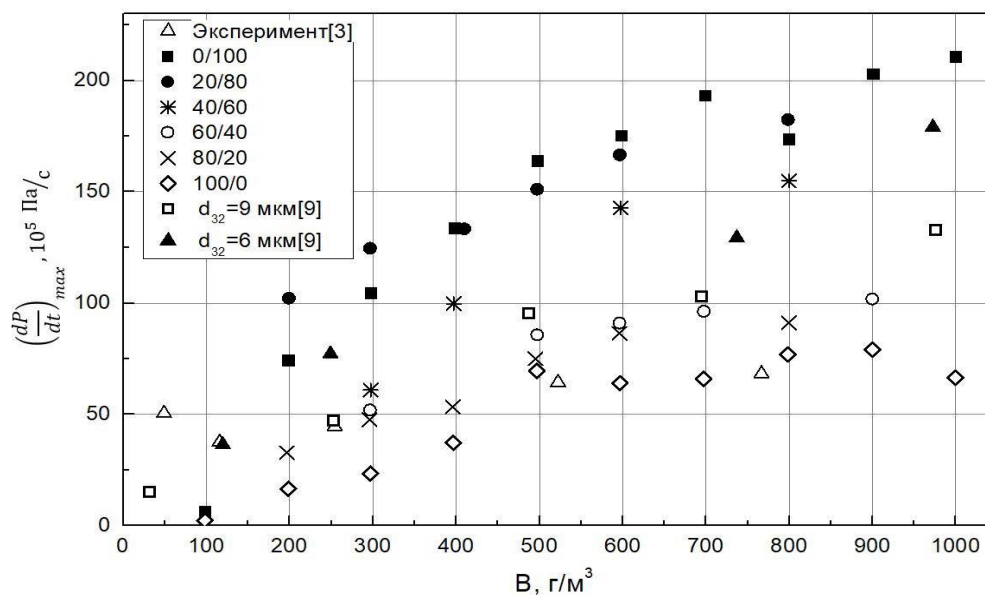


Рис. 6. Зависимость максимальность скорости нарастания давления взрыва от концентрации горючего порошка.

менять удельную реакционную поверхность порошка во взвеси $S_{\text{по}} = \frac{3B}{\rho_s r_{32}}$, где B – массовая концентрация металла, ρ_s – плотность алюминия, $r_{32} = \frac{r_{30}^3}{r_{20}^2}$. Для каждого вида горючего изучалась зависимость P_{max} и $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\text{max}}$ от концентрации. Для каждого образца проводилось не менее пяти опытов, по которым находились средние значения указанных величин. Экспериментальные данные приведены на рис. 5 и 6.

Результаты и обсуждение

Обращают на себя внимание следующие обстоятельства. Что касается максимального давления взрыва отметим, что данные, полученные нами в условиях бомбы объемом 4 л, хорошо согласуются с теоретически рассчитанными значениями [6], однако превосходят таковые [3], полученные по европейской методике в сферическом сосуде объемом 20 л. Такое различие можно объяснить, если предположить, что равномерно запылить большой объем сложно. Если запылятся только часть объема, то естественно, результирующее давление в сосуде будет меньшим. Далее, значения P_{max} для мелкодисперсного порошка АСД-4 несколько превосходят таковые для АСД-1. Это и не удивительно, поскольку теоретические значения получены для условий адиабатичности и одновременного протекания процесса во всем объеме (т.е. в режиме теплового взрыва), в то время как в реальных условиях процесс протекает в условиях распространения волны горения по пыли. Иными словами, теоретические значения – это экстремальные, максимально возможные значения. Естественно, для быстрогорящей

пыли АСД-4 условия в большей мере соответствуют адиабатичности, что и обуславливает большие значения P_{max} . В целом можно отметить достаточно слабую зависимость P_{max} от дисперсности алюминия, что соответствует теоретическим положениям, поскольку теоретически P_{max} находится только из термодинамических соотношений. В связи с этим отметим, что теоретическое наибольшее значение P_{max} [6,9] соответствует концентрации $B = 550 \text{ г/м}^3$, что весьма близко к экспериментальным данным всех авторов. Обращает на себя внимание то, что эта концентрация почти в два раза превосходит стехиометрическую. Это обусловлено тем, что давления определяются не только температурой (ее максимальное значение соответствует стехиометрии), но и долей газообразных продуктов сгорания [13].

Что касается $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\text{max}}$, прежде всего отметим, что экспериментальные данные, полученные различными авторами [6-11], могут отличаться на порядок, что обусловлено очень сильным влиянием начального уровня турбулентности на реализуемые значения $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\text{max}}$ [4]. Зачастую количественные характеристики интенсивности турбулентности исходного облака неизвестны. Естественно, что этот уровень снижается по мере увеличения времени задержки зажигания. В наших опытах это время подбиралось из данных видеосъемки процесса запыления, как время до исчезновения видимого вихревого движения в облаке.

Существенная зависимость $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\text{max}}$ от размера частиц обусловлена тем, что по мере увеличения доли крупнодисперсного порошка в пыли возрастает эффективный размер частиц (уменьшается удельная реакционная поверхность), что приводит

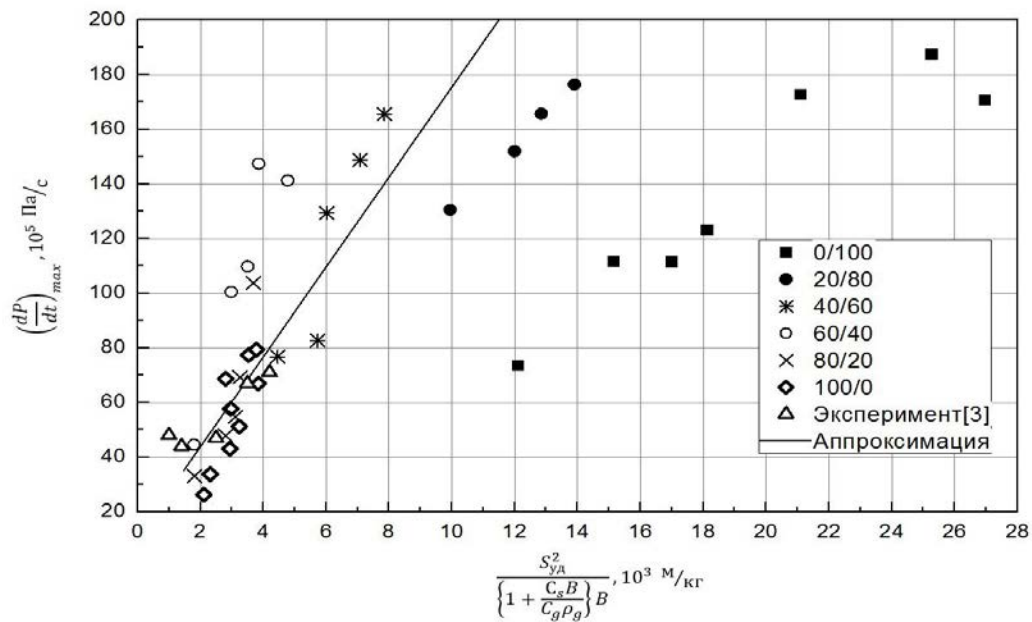


Рис. 7. Зависимость максимальной скорости нарастания давления от дисперсных свойств горючего при диффузионном режиме реагирования частиц.

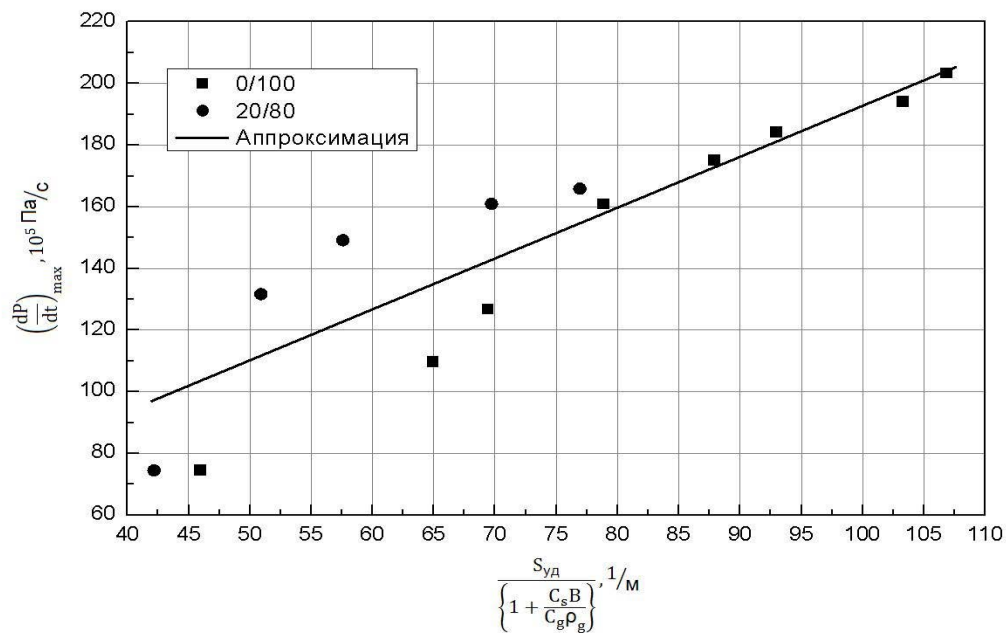


Рис. 8. Зависимость максимальной скорости нарастания давления от дисперсных свойств горючего при кинетическом режиме реагирования частиц.

к уменьшению $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$. Естественно, данные для смешанных порошков располагаются между соответствующими зависимостями для АСД 1 и АСД 4. Отметим также, что размеры частиц для этих порошков различаются практически в три раза. То есть если предположить, что горение частиц АСД 4 происходит в диффузионном режиме, то $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ для АСД 1 и АСД 4 должны бы различаться почти на порядок, поскольку

ку [9] $\left(\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \cdot \frac{1}{r_{32}^2}\right)$. Вероятной причиной этому может быть предположение о кинетическом режиме горения частиц алюминия АСД-4 (а так же состава 80% АСД-4 + 20% АСД-1). Подтверждение этому можно найти в работах [14,15].

Для анализа зависимости максимальной скорости нарастания давления обратимся к теоретическому значению [13], полученному в предположении о диффузионном режиме горения частиц:

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} = \frac{qDC_{ок}Rk}{\mu_g C_g \beta_{st}} \frac{3B}{\left\{1 + \frac{C_s B}{C_g \rho_g}\right\} \rho_s r_{32}^2} \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, q – тепловой эффект реакции на единицу массы горючего, D – коэффициент диффузии кислорода в газовой смеси, k – отношение радиуса зоны горения к начальному размеру частицы, β_{st} – стехиометрический коэффициент, $C_{ок}$ – концентрация кислорода в воздухе, μ_g – молекулярная масса воздуха, C_s , C_g – удельные теплосъемности горючего (частиц) и воздуха. В таком подходе для оценки $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ полнота превращения не имеет существенного значения, поскольку $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ соответствует максимальной скорости горения частиц, т.е. скорость горения в начальный момент, когда выгорание еще несущественно.

Заметим, что в работе [13] допущена ошибка – вывод о существовании максимальных значений $V_{\max}$ является неверным. Можно говорить только об асимптотическом значении ($C_s B \gg C_g \rho_g$), равном

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{ac} = \frac{qDC_{ок}R\rho_g k}{\mu\rho_s \beta_{cm} C_s r_{32}^2} \quad (2)$$

Его численные значения в несколько раз превосходят экспериментально достижимые значения, что и неудивительно, поскольку экстремальные значения соответствуют ситуации, когда взвесь воспламеняется и сгорает одновременно во всем объеме. В реальной ситуации процесс протекает в режиме распространения пламени. Для ламинарного режима в [16] получено следующее выражение для нормальной скорости пламени V_H :

$$V_H^2 = \frac{qDC_{ок}}{(C_g \rho_g + C_s B)\left(1 + \frac{C_s B}{C_g \rho_g}\right)\beta_{cm}} \cdot \frac{3B}{\rho_g (T_{s_i} - T_0)r_{32}^2} \quad (3)$$

Из (3) следует, что максимальная скорость, следовательно и максимальные $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ достигаются при $V_{\max} = \rho_g \frac{C_g}{C_s}$ (для этого необходимо положить $\frac{dV_H}{dB} = 0$). Для алюминия $V_{\max} = 1170$ г/м³ ($\rho_g = 1,13$ кг/м³). В наших экспериментах такие значения достигнуты не были, однако это значение весьма близко к такому, полученным в работах других авторов.

Обратимся к интерпретации экспериментальных данных. Для этого перепишем выражение (1), введя в качестве аргумента S_{yd} :

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} = \frac{qDC_{ок}Rk\rho_s}{3\mu_g C_g \beta_{st}} \frac{S_{yd}^2}{\left\{1 + \frac{C_s B}{C_g \rho_g}\right\} B} \quad (4)$$

На рис. 7 приведены зависимости $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ от параметра $\frac{S_{yd}^2}{\left\{1 + \frac{C_s B}{C_g \rho_g}\right\} B}$. Сплошная линия на рисунке – расчет по (2), при этом для упрощения было принято, что $k = \text{const} = 2,5$ [8].

Как видно из рисунка для аэрозвеси АСД-1 и комбинированных составов АСД-1/АСД-4 80/20, 60/40 и 40/60. Для порошков АСД-4 и состава 20/80 имеет место существенное несоответствие. Естественно предположить, что при наличии значительного количества крупнодисперсного порошка, горение частиц происходит в режиме, близком к диффузионному. Для порошка АСД-1 это было показано в [17] для ламинарного режима распространения пламени в диапазоне концентраций 100 – 1200 г/м³.

Что касается мелкодисперсного алюминия АСД-4, то здесь такой однозначности нет. Действительно, объективным признаком диффузионного режима горения частиц в волне горения является то, что в отличие от кинетических пламен, для которых максимальное значение нормальной скорости от концентрации находится вблизи стехиометрии, для диффузионных пламен это значение в несколько раз превосходит стехиометрическое. Такой вывод также следует и из работы [18] по горению одиночных крупных (90 и 250 мкм) частиц алюминия.

В работе [16] приведены данные для АСД-4 полученные в условиях вертикальных полужакрытых реакционных труб, в предположении диффузионного режима горения. Однако эксперименты проводились для концентраций не превышающих стехиометрические значения. В работе [12] в условиях пылевой горелки, для концентраций, существенно превосходящих стехиометрические, получены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что горение частиц алюминия ($d_{10} = 5,7$ мкм) контролируется кинетикой химической реакции.

В этой связи обратимся к теоретическим исследованиям [12], проведенным именно для случая кинетического режима. Легко показать, что при этом зависимость $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ от S_{yd} передается следующим выражением

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \sim \frac{S_{\ddot{a}\ddot{a}}}{\left\{1 + \frac{C_s B}{C_g \rho_g}\right\}} \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности содержит комплекс характеристик, аналогичных (2), а также

кинетические параметры поверхностного реагирования, которые остаются неизвестными.

Приведенные на Рис. 8 данные для АСД-4 и смешанного состава 20/80 близки к линейной зависимости от правой части (3), что качественно свидетельствует о правомерности предположения о кинетическом (или, вероятней всего, переходном) режиме горения частиц мелкодисперсного алюминия.

Наконец, что касается такого параметра взрываемости как $k_{st} = V^{1/3} \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max}$, где V – объем взрывного сосуда. В [18] предлагается в качестве объективной характеристики, учитывающей масштабирование экспериментальных установок, принимать именно этот параметр.

Отметим, что для всех подобных экспериментов с пылями, даже при близких условиях проведения опытов, наблюдается существенное (иногда более, чем на порядок) различие значений k_{st} , как и для самой величины $\left(\frac{dP}{dt} \right)_n$ [4]. Это обусловлено очень сильной зависимостью $\left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max}$ (а, следовательно, и k_{st}) от начального уровня турбулентности в сосуде. Рекомендации [4] по использованию k_{st} сводятся практически к тому, что опыты для различных порошков должны проводиться в одинаковых условиях, т.е. при фиксированном объеме сосуда и времени задержки зажигания. Однако при этом использовать k_{st} и $\left(\frac{dP}{dt} \right)_m$ можно с одинаковым правом.

Заключение

Приведенные систематические исследования зависимости максимального давления взрыва и максимальной скорости нарастания давления от дисперсных характеристик алюминиевой пыли наряду с приведенными в литературе аналогичными исследованиями, позволяют сделать следующие выводы.

1. Максимальное давление взрыва является термодинамической характеристикой горючей пыли, слабо зависит от дисперсности и существенно зависит от концентрации горючего, принимая наибольшие значения при концентрациях, существенно превосходящих стехиометрические. Это обусловлено как выделением тепла при горении, так и образованием газообразных продуктов сгорания. В случае алюминия таковыми являются газофазные промежуточные и конечные оксиды, образующиеся при горении.

2. Максимальная скорость нарастания давления, являясь динамической характеристикой, существенно зависит от концентрации и дисперсности пыли и достигает наибольших значений при концентрациях в несколько раз превосходящих стехиометрические.

3. Наиболее вероятным режимом горения крупных частиц алюминия является диффузионный, а для мелкодисперсных – кинетический.

Литература

- [1]. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: в 2-х книгах / А.Я. Корольченко, А. Н. Баратов, Г. Н. Кравчук и др. – Москва: Химия, 1990. – 496с
- [2]. ГОСТ-12.1.041. Система стандартов безопасности труда. Пожароопасность горючих пылей. М., 2011, – 45 с.
- [3]. Б.-Ц. Линь, В.-С. Ли, Ч.-ЦЗ. Чжу. Экспериментальное исследование характеристик взрыва смеси наночастиц алюминия и воздуха. // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т.46, №6. – С. 73-77.
- [4]. Eckhoff, Rolf K. Dust Explosions in Process Industries, Second Edition ed. / Rolf K. Eckhoff. – Cambridge: University Press, 1997. – 643p.
- [5]. Bartknecht W. Dust Explosions. – Springer, 1990.
- [6]. Castellanos, D., Carreto-Vazquez, V., Mashuga, C., Trottier, R., Mejia, A. and Mannan, M. (2014). The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust. Powder Technology, 254, pp. 331-337.
- [7]. ASTM. E1226-00. Standard test method for pressure and rate of pressure rise for combustible dusts. 14.02, 2005, pp. 334-345.
- [8]. Li, Q., Wang, K., Zheng, Y., Mei, X. and Lin, B. (2016). Explosion severity of micro-sized aluminum dust and its flame propagation properties in 20 L spherical vessel. Powder Technology, 301, pp. 1299-1308.
- [9]. Dufaud, O., Traoré, M., Perrin, L., Chazelet, S. and Thomas, D. (2010). Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23(2), pp. 226-236.
- [10]. Santhanam, P., Hoffmann, V., Trunov, M. and Dreizin, E. (2010). Characteristics of Aluminum Combustion Obtained from Constant-Volume Explosion Experiments. Combustion Science and Technology, 182(7), pp. 904-921.
- [11]. Liu, X. and Zhang, Q. (2015). Influence of turbulent flow on the explosion parameters of micro- and nano-aluminum powder-air mixtures. Journal of Hazardous Materials, 299, pp. 603-617.
- [12]. Черненко Е.В., Розенбанд В.И. Расчет экстремальных характеристик горения аэрозвесей металлических порошков при их самовоспламенении, ФГВ, 1980. – Т.16, №6, – С. 3-10.
- [13]. Опарин А.С., Шевчук В.Г. Экстремальные характеристики теплового взрыва пылей. // Горение и плазмохимия. – 2012. – Т. 10, №3, – С. 187-193.
- [14]. Агеев Н.Д., Горошин С.В., Золотко А.Н., Полетаев Н.И. Скорость распространения стационарного

- пламени в газовзвешях алюминия. // Сборник «Горение гетерогенных систем». – 1989. – Черноголовка, – С. 83-85.
- [15]. Сандарам Д., Янг В., Зарко В.Е. Горение наночастиц алюминия (Обзор) // Физика горения и взрыва. – 2015. – Т.51 №2, – С. 37-63.
- [16]. Сидоров А.Е., Шевчук В.Г. Ламинарное пламя в мелкодисперсных пылях // Физика горения и взрыва. – 2011. – Т.47, №5, – С. 24-28.
- [17]. Сидоров А.Е., Кондратьев Е.Н., Бойчук Л.В., Шевчук В.Г. Горение алюминиевой пыли при больших концентрациях горючего // Горение и плазмохимия. – 2005. – Т. 3, №3, – С. 221-226.
- [18]. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. // Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – М.

Explosive properties of aluminum dust

A.S. Oparin, Ph.K. Bulanin, A.E. Sidorov, N.I. Poletaev, V.G. Shevchuk

Institute of Combustion and Advanced Technologies,
Odessa National University of I.I. Mechnikov,
Dvoryanskaya str., 2, 65082, Odessa, Ukraine

ABSTRACT

The article presents the maximum pressure ($P_{\max}$) and the maximum pressure rise rate $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ dependence studies results on the dispersed characteristics of aluminum dust. The studies were carried out for suspensions of aluminum powders ASD-1 and ASD-4, as well as their mixtures in various mass ratios in order to identify the effect of the dust specific surface on their explosive characteristics. To determine the explosive characteristics of combustible suspensions, a modified standard 4 l constant volume vessel method was used. As a result of research and comparison with the data available in the literature, it has been found that the maximum explosion pressure weakly depends on the dispersion and significantly depends on the fuel concentration. The maximum rate of pressure rise significantly depends on the concentration, dispersion

of dust and the turbulence initial level, reaching the highest values at concentrations several times higher than stoichiometric.

Keywords: air suspension, aluminum, maximum explosion pressure, maximum pressure build-up rate.

Алюминий шаңының жарылыстық қасиеттері

А.С. Опарин, Ф.К. Буланин, А.Е. Сидоров, Н.И. Поле-таев, В.Г. Шевчук

Мечников атындағы Одесса Ұлттық университеті,
Жану және дәстүрлі емес технология институты,
65082, Одесса Украина

АНДАТПА

Мақалада максималды қысым мен жарылыстың қысымының артуының максималды жылдамдығының $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$ алюминий шаңының дисперсті сипаттамасына тәуелділігі зерттелген. Меншікті беттік ауданының жарылыстық қасиетіне әсерін зерттеу үшін, АСД-1 және АСД-4 алюминий ұнтақтарына, сонымен қатар, олардың әр түрлі қатынаста дайындалған қоспаларына зерттеу жасалды. Жанғыш қоспалардың жарылыстық қасиетін зерттеу үшін, көлемі 4 л модификацияланған құрылғы қолданылды. Зерттеу нәтижелері мен әдебиеттегі нәтижелерді салыстыру арқылы, жарылыстың максималды қысымы дисперстілікке қатты тәуелді емес, жанғыш заттың концентрациясына тәуелді болатыны анықталды. Қысымның өсуінің максималды жылдамдығы, концентрациядан, дисперстіліктен, және де турбуленттіліктің бастапқы деңгейінен тәуелді болып, стехиометриялық мәннен бірнеше есе артық болатын концентрация кезінде ең үлкен мәнге ие болатыны анықталды.

Кілттік сөздер: аэроөлшенділер, алюминий, жарылыстың максималды қысымы, қысым артуының