

нять график, кривая дана без экспериментальных точек. Надо иметь в виду, что как представленные в данной статье экспериментальные результаты, так и приведенные в [4] для графита получены не только в совершенно идентичных режимных условиях, но и на той же экспериментальной установке, по одним методам нагревались частицы и измерялись все параметры.

Таким образом, различие в протекании процесса вносит природа материала, состояние его поверхности. Именно такая точка зрения высказывалась при анализе аномалии при высокотемпературном горении и газификации углерода [4, 6—8]. Более детальный анализ этого явления сейчас сделать не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головина Е. С. Высокотемпературное горение и газификация углерода.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Рааск Е. Тр. амер. общ-ва инж.-мех. Энергетические машины и установки.— 1966, 1, 45.
3. Делягин Г. Н. ФГВ, 1983, 19, 4, 110.
4. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва.— М.: Изд-во МГУ, 1957.
5. Гиршфельдер Д. Ж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей.— М.: ИЛ, 1961.
6. Яворский И. А., Маланов М. Р. ХТТ, 1969, 1, 139.
7. Летор М. // Реакции углерода с газами.— М.: ИЛ, 1963.
8. Nagle J. R., Sfrieland R. F. // Proc. 5th Conference of Carbon, 1962.— Vol. 1.

Поступила в редакцию 15/VI 1987,
после доработки — 18/III 1988

УДК 536.46 + 534.222

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГАЗОВЗВЕСЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ В ОТРАЖЕННЫХ УВ

В. М. Бойко, В. В. Лотов, А. Н. Папырин
(Новосибирск)

В последние годы большое внимание уделяется проблеме взрывобезопасности при работе с пылевидными и порошковыми материалами. Одна из важных задач в этой проблеме — исследование характеристик самовоспламенения и горения двухфазных смесей за фронтом ударной волны (УВ) в диапазоне температуры и давления, характерном для пылегазовых взрывов: $T = 1000 \div 2500$ К, $p = 1 \div 6$ МПа. Расчет задержек самовоспламенения взвесей твердого горючего в атмосфере газообразного окислителя представляет значительные трудности, так как к кинетическим процессам добавляются теплообмен, плавление, испарение и т. д., требующие дальнейшего изучения [1]. Поэтому большой интерес представляют экспериментальные исследования процессов самовоспламенения и горения двухфазных смесей, проводимые при помощи методики ударных труб. Однако количество публикаций на эту тему незначительно. В частности, их изучению посвящены работы [4—7].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования самовоспламенения и горения порошков магния и алюминия в атмосфере чистого кислорода за отраженными УВ при $T_2 = 1000 \div 2000$ К, $p_2 = 1 \div 3$ МПа, полученные с помощью методики фотографической регистрации.

Исследования проводили на установке, состоящей из ударной трубы (длина камер высокого и низкого давления соответственно 1,5 и 5 м, сечение капала 56×56 мм), диагностической аппаратуры, схемы управления и синхронизации. В качестве толкающего газа использовали гелий при $p = 2,5 \div 5,0$ МПа, начальное давление кислорода $p = 10 \div 100$ кПа.

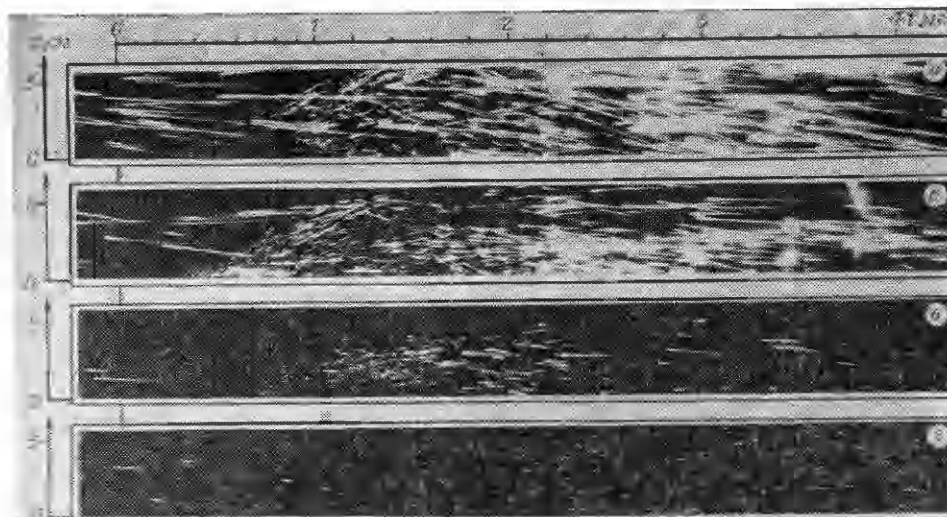


Рис. 1. Фоторазвертки процессов воспламенения и горения порошков магния; $d = 40 \div 63$ мкм, $m = 2$ мг, $\Delta t = 100$ мкс.
 а) $M = 3,8$, $T_2 = 1820$ К, $p_2 = 1,1$ МПа; б) $M = 3,5$, $T_2 = 1600$ К, $p_2 = 1,6$ МПа; в) $M = 3,3$, $T_2 = 1460$ К, $p_2 = 1,9$ МПа; г) $M = 3,1$, $T_2 = 1330$ К, $p_2 = 2,0$ МПа.

Навески порошков, масса m которых варьировалась от 0,2 до 20 мг, вводили в канал: а) при помощи электромагнитного ударника, установленного на нижней стенке измерительной секции в 10 мм от отражающего торца и подбрасывающего порошок на заданную высоту; б) размещением порошка на тонкой керамической подложке, закрепленной на вольфрамовой проволоке диаметром 0,1 мм. Подложку располагали по оси канала на расстоянии 10—40 мм от торца. Воздействие спутного газового потока за фронтом падающей УВ приводило к срыву частиц и образованию облака газозвеси; в) порошок насыпали тонким слоем на полированной поверхности металлической пластины ($25 \times 56 \times 1500$ мм), закрепленной на нижней стенке ударной трубы. Подъем частиц и образование газозвеси происходили под действием газового потока за фронтом падающей УВ.

Излучение горящих частиц регистрировали через стеклянное окно размером 4×100 мм высокоскоростной камерой ЖФР-1, работающей в режиме фотохронографа. Синхронизацию исследуемого процесса с моментом прихода УВ к отражающей стенке, а также введение временного масштаба проводили при помощи серии импульсов света, генерируемых лазерным стробоскопом [8]. Точность установки временных интервалов Δt между импульсами $\pm 0,2$ мкс. Первый импульс генерации появлялся через Δt после прихода сигнала с пьезодатчика, установленного на торце. Изображения световых меток хорошо видны в верхней части фоторазверток рис. 1—3.

В опытах использовали 4 вида образцов:

1 — порошок Al чистотой 99,2% с частицами сферической формы, рассеянный на узкие фракции при помощи воздушно-центробежного классификатора. Использовалась фракция 3—5 мкм. Границы фракции определялись размерами частиц, вероятность попадания которых как в крупную, так и в мелкую фракцию одинакова;

2 — порошок сплава 89,4% Al + 10,6% Fe с частицами сферической формы, рассеянными на фракции с помощью сит, и известным гранулометрическим составом внутри фракции (см. таблицу). Использовалась фракция 0—20 мкм;

3 — алюминиевая пудра с частицами в виде пластинок размером 20—30 мкм, толщиной 2—5 мкм;

4 — сферодизированные порошки Mg фракций 40—63 и 63—80 мкм, полученные рассевом через сито.

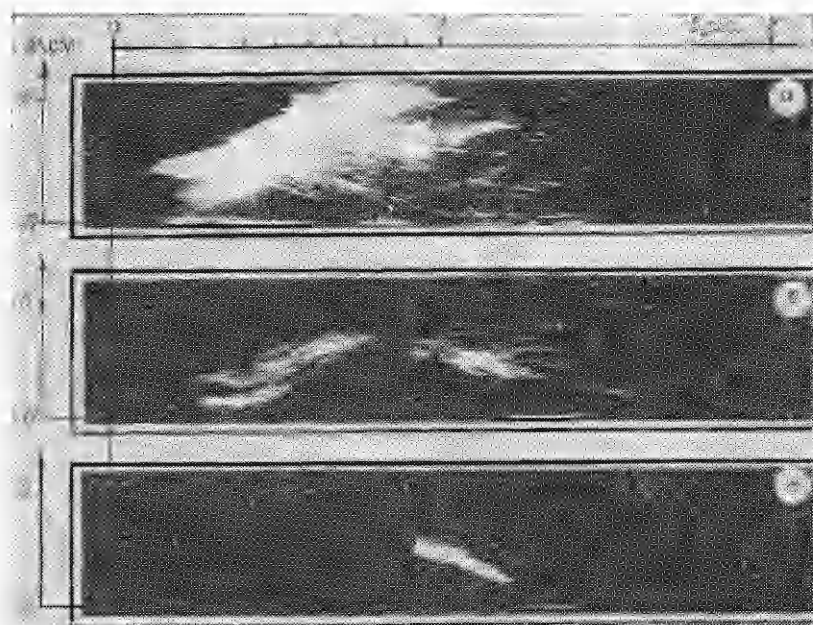


Рис. 2. Фоторазвертки процессов воспламенения и горения порошков алюминия. Сплав 89,4 % Al + 10,6 % Fe, $d = 0 \div 20$ мкм, $m = 0,25$ мг, $\Delta t = 100$ мкс.
 а) $M = 4,0$, $T_2 = 1980$ К, $p_2 = 1,1$ МПа; б) $M = 3,9$, $T_2 = 1900$ К, $p_2 = 1,1$ МПа; в) $M = 3,8$, $T_2 = 1820$ К, $p_2 = 1,1$ МПа.

Опыты, проведенные в одинаковых условиях, но при различных способах создания газозвеси, показали, что наличие подложки (пластины) не влияет на характеристики воспламенения. Однако лучшая воспроизводимость опытов (количество воспламенившихся частиц при одинаковой навеске порошка) наблюдалась при распылении с подложки.

На рис. 1 приведены фоторазвертки процессов воспламенения и горения газозвеси порошка Mg в зависимости от интенсивности падающей УВ. Отчетливо наблюдаются изображения отдельных горящих частиц в виде треков с широкой яркой головкой, переходящей в длинный, плавно сужающийся по ширине, хвост с постепенным затуханием свечения. Началу горения частицы соответствует момент внезапного появления яркого свечения, при этом ширина трека быстро достигает своего максимального значения, в 4—6 раз превышающего ширину хвоста. Среди изображений горящих частиц видно большое количество треков с

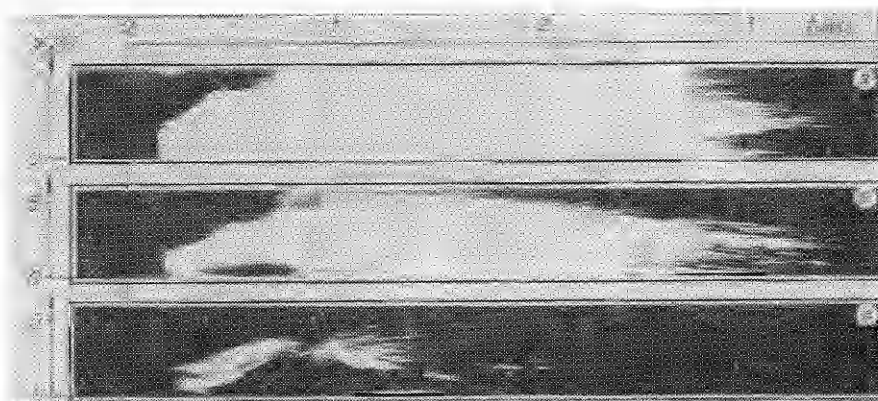


Рис. 3. Воспламенение и горение газозвеси частиц Al в зависимости от массы порошка. Образец 2, $M = 3,9$, $T_2 = 1900$ К, $p_2 = 1,1$ МПа, $\Delta t = 100$ мкс.
 m , мг: а) 5, б) 1, в) 0,25.

k	d _k , мкм	d = 0 ÷ 20 мкм			d = 20 ÷ 32 мкм			d = 32 ÷ 63 мкм		
		N _k	N _k , %	v _k , %	N _k	N _k , %	v _k , %	N _k	N _k , %	v _k , %
1	2,5	1785	65,8	2,6	44	2,6	0	100	5,7	0
2	7,5	720	26,6	27,9	440	25,6	0,4	574	32,6	0,2
3	12,5	144	5,3	25,9	148	8,6	0,7	180	10,2	0,3
4	17,5	43	1,6	21,2	73	4,3	0,9	78	4,4	0,4
5	22,5	16	0,6	16,8	40	2,3	1,0	29	1,6	0,3
6	27,5	3	0,1	5,7	238	13,9	11,4	30	1,7	0,5
7	32,5	0	0	0	283	16,5	22,4	31	1,8	0,9
8	37,5	0	0	0	338	19,7	41,1	53	3,0	2,4
9	42,5	0	0	0	79	4,6	14,0	52	3,0	3,4
10	47,5	0	0	0	33	1,9	8,1	178	10,1	16,1
11	52,5	0	0	0	0	0	0	264	15,0	32,2
12	57,5	0	0	0	0	0	0	70	4,0	11,2
13	62,5	0	0	0	0	0	0	46	2,6	9,5
14	67,5	0	0	0	0	0	0	34	1,9	8,8
15	72,5	0	0	0	0	0	0	32	1,8	10,3
16	77,5	0	0	0	0	0	0	9	0,5	3,5
$\sum_{k=1}^{16}$		2711	100	100	1716	100	100	1761	99,9	100

Примечание. k — номер интервала, d_k — средний диаметр частиц k-го интервала, N_k — число частиц, имеющих диаметры от d_k — 2,5 мкм до d_k + 2,5 мкм, N_k, % = 100 % · N_k / $\sum_{k=1}^{16} N_k$, v_k, % = 100 % · N_kd_k³ / $\sum_{k=1}^{16} N_k d_k^3$.

одной головкой и многими расходящимися под разными углами хвостами, что характерно для дробящихся частиц.

Рис. 2 иллюстрирует процессы воспламенения и горения мелкодисперсных порошков Al при различных значениях числа Маха M падающей УВ. Картина типична для всех испытанных порошков Al. Также отчетливо видны треки, соответствующие отдельным частицам. В отличие от рис. 1 ширина треков практически не изменяется от момента воспламенения до погасания частиц.

Период задержки самовоспламенения отдельной частицы τ_{иг} определяли по фоторазверткам как интервал времени от момента отражения УВ до появления интенсивного свечения, а время ее горения τ_с — по длине яркой части трека. Полученные данные показывают, что процесс воспламенения начинается с мелких частиц, поскольку в начальной стадии преобладают короткие треки. С течением времени треки удлиняются, что связано с воспламенением и горением более крупных частиц. Время горения частицы в несколько раз меньше периода задержки ее самовоспламенения, например, для порошков Mg при M = 3,75, T₂ ≈ 1780 К τ_{иг}/τ_с ≥ 4 (см. рис. 1, а), а при M = 3,1, T₂ ≈ 1330 К τ_{иг}/τ_с ≥ 20 (см. рис. 1, б).

Отмечен широкий спектр значений τ_{иг} и τ_с для отдельных частиц в каждой фракции, полученной ситовым рассевом, причем τ_{иг} для частиц с одинаковой длительностью горения могут различаться в несколько раз [7]. При снижении числа M падающей УВ и соответственно температуры газа T₂ в отраженной УВ τ_{иг} растет и уменьшается число воспламенившихся частиц.

На рис. 3 приведены фоторазвертки в опытах с Al в зависимости от массы навески порошка. Видно, что при изменении m от 0,25 до 1 мг существенно возрастает количество крупных воспламенившихся частиц данной фракции и увеличивается общее время горения навески. При этом также растет время достижения максимума интенсивности свечения горящих частиц, т. е. изменяется распределение интенсивности свечения во времени. Последнее, очевидно, связано с поджигающим действием мелких частиц, поскольку значительный тепловой эффект реакции окисления при достаточном количестве горящих частиц приводит к повышению

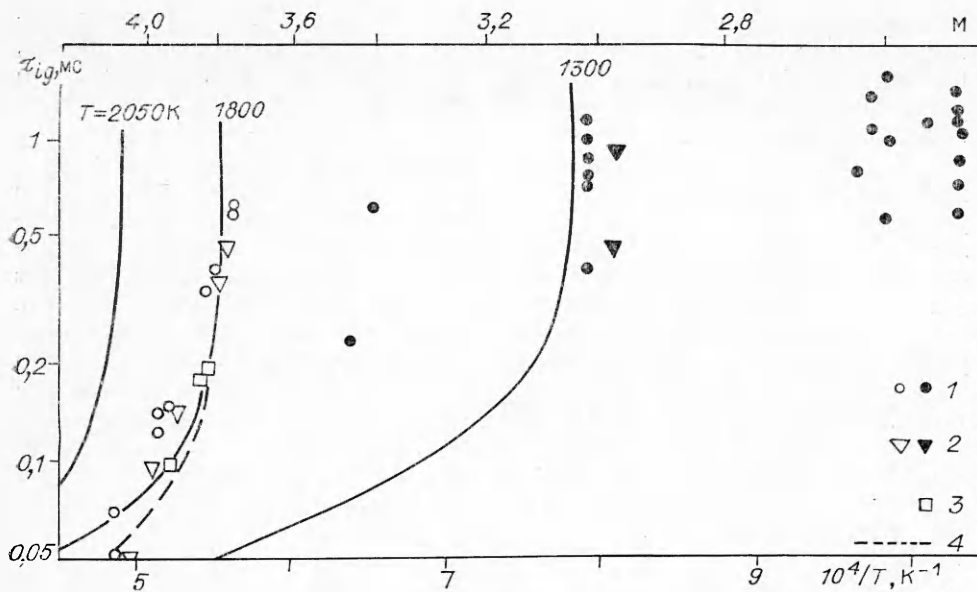


Рис. 4. Задержки воспламенения газозвзвесей порошков алюминия в атмосфере чистого кислорода за отраженной УВ.
1—3 — номер образца; 4 — расчет ($d = 4$ мкм).

температуры среды. Последующее увеличение m от 1 до 5 мг не изменяет характера распределения интенсивности свечения во времени. Приведенные на рис. 3 результаты показывают также, что момент появления свечения при возгорании частиц полидисперсной фракции не зависит от массы навески. В связи с данными обстоятельствами τ_{ig} для полидисперсных порошков целесообразно определять именно по моменту появления первых воспламенившихся частиц.

Данные по задержкам воспламенения порошков Al в зависимости от температуры кислорода за отраженной УВ приведены на рис. 4 (светлые значки). Обращает внимание резкое возрастание τ_{ig} при приближении температуры среды со стороны высоких значений к ~ 1800 К. Влияние вида порошков на зависимость τ_{ig} ($1/T$) не обнаружено, хотя исследуемые образцы порошков отличаются как по форме частиц, так и по составу металла.

На рис. 5 представлены результаты измерения задержек воспламенения порошков Mg в зависимости от температуры газа за отраженной УВ. Видно, что зависимости τ_{ig} ($1/T$) для двух фракций совпадают и соответствуют данным для фракции 63—100 мкм, полученным в [7]. Сравнение фоторазверток показало, что с увеличением среднего размера частиц (номера фракции) уменьшается общая доля воспламенившихся частиц, однако начало воспламенения остается неизменным.

Этот факт, а также различие в значениях τ_{ig} для фракций 1—40 и 63—100 мкм [7] можно объяснить на основе анализа функций распределения частиц по размерам внутри фракций, получаемых посредством ситового отсева. Из данных таблицы следует, что наиболее мелкие частицы ($d = 0—5$ мкм) содержатся в основном в первой фракции. Во второй и последующих фракциях мелкие частицы также присутствуют, однако максимум

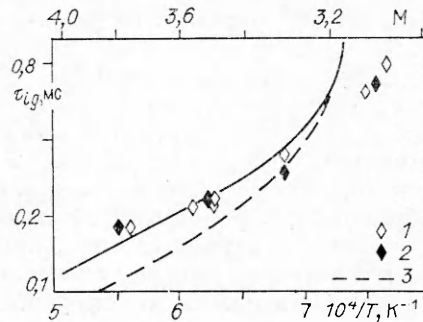


Рис. 5. Задержки воспламенения порошков Mg.

1 — $d = 40 \div 63$ мкм; 2 — $d = 63 \div 80$ мкм; 3 — расчет ($T_2 = 1368$ К, $d = 7,5$ мкм).

их распределения приходится уже на интервал 5—10 мкм. Поэтому различие в значениях τ_{ig} для фракций 1—40 мкм и последующих (40—63, 63—80, 63—100 мкм) можно объяснить различием наиболее вероятного размера мелких частиц в первой ($d \approx 2,5$ мкм) и последующих ($d \approx 7,5$ мкм) фракциях.

В задержке самовоспламенения частицы, определяемой как период времени от момента приложения внешнего воздействия до момента устойчивого воспламенения, можно выделить два характерных интервала: время инертного прогрева частицы, когда можно пренебречь химическими превращениями, и время индукции химической реакции. Из этих двух интервалов наиболее просто оценивается длительность первого.

В процессе инертного нагрева можно выделить три характерных участка: нагрев за счет конвективного теплообмена во время ускорения частицы в проходящей УВ, за счет конвективного теплообмена во время торможения за отраженной УВ и за счет теплопроводности в покоящемся газе за отраженной УВ. Если считать, что основным видом теплообмена между частицей и средой в период индукции является теплопроводность, то время прогрева частиц до температуры воспламенения T_* дается выражением [11]

$$\tau_* = \frac{\rho_s d^2}{12\lambda_2} \left(c_s \ln \frac{T_2 - T_{s2}}{T_2 - T_*} + \frac{\Delta H}{T_2 - T_{пл}} \right), \quad (1)$$

где T , λ — температура и коэффициент теплопроводности газа; ρ_s , c_s , $T_{пл}$, ΔH — плотность, теплоемкость, температура и теплота плавления материала частицы.

Значение T_{s2} , до которой нагревается частица путем конвективного теплообмена за время скоростной релаксации в проходящей и отраженной УВ, можно оценить из следующих выражений, полученных из уравнений движения и теплового баланса:

$$T_{s2} = T_2 - (T_2 - T_{s1}) \exp \left(- \frac{6\lambda_2 \langle Nu_2 \rangle \tau_2}{\rho_s d^2 c_s} \right), \quad (2)$$

$$T_{s1} = T_1 - (T_1 - T_0) \exp \left(- \frac{6\lambda_1 \langle Nu_1 \rangle \tau_1}{\rho_s d^2 c_s} \right). \quad (3)$$

Здесь $\tau_i = \frac{4\rho_s d}{3c_d \rho_i u_i}$ — характерное время скоростной релаксации частицы;

$\langle Nu_i \rangle = \frac{1}{\tau_i} \int_0^{\tau_i} Nu_i(t) dt$ — среднее по времени число Нуссельта, которое

определяется по формуле [10]: $Nu_i = 2 + 0,46 Re_i^{0,55} Pr^{0,33}$; Pr — число Прандтля; $Re_i = \rho_i [u_i - v_s(t)] d / \mu_i$ — число Рейнольдса; $u_i - v_s(t) = u_i \exp(-t/\tau_i)$; $c_d(Re)$ — коэффициент аэродинамического сопротивления; v_s — скорость частицы; ρ_i , μ_i , u_i — плотность, коэффициент вязкости и скорость газа; индексы $i = 1$ и 2 соответствуют параметрам газа за проходящей и отраженной УВ.

При вычислении зависимостей $\tau_*(T)$ брали следующие значения физических параметров [9]. Алюминий: $\rho_s = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_s = 1,01 \times 10^3$ Дж/(кг·К), $T_{пл} = 933$ К, $\Delta H = 4 \cdot 10^5$ Дж/кг; магний: $\rho_s = 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_s = 1,17 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $T_{пл} = 923$ К, $\Delta H = 3,7 \cdot 10^5$ Дж/кг; кислород: $\lambda = \lambda_0 (T/T_0)^{0,75}$, $\lambda_0 = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Дж/(м·с·К), $\mu = \mu_0 (T/T_0)^{0,5} (1 - B/T_0) (1 - B/T)^{-1}$, $\mu_0 = 2,02 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), B — постоянная Сезерленда, $T_0 = 290$ К. Исходя из приведенных выше соображений, размер частицы Al принимали равным наиболее вероятному для образцов 1, 2 ($d = 4$ мкм), а для частицы магния $d = 7,5$ мкм.

Следует отметить, что данные по прямому измерению температуры воспламенения частиц алюминия немногочисленны и противоречивы. Так в [11] в опытах со сферическими частицами ($d = 15 \div 65$ мкм), вы-

полненных на установке с плоскопламенной газовой горелкой, найдено, что T_* близка к температуре плавления окисла Al_2O_3 ($T_{\text{пл}}^{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2318 \text{ K}$) и практически не зависит от d . Согласно же данным работы [12], полученным для частиц Al с $d = 0 \div 50$ мкм на установке с аргонодуговой горелкой, T_* зависит от размера частиц и при $d \approx 6$ мкм имеет минимум $\sim 1000 - 1300 \text{ K}$, что существенно ниже $T_{\text{пл}}^{\text{Al}_2\text{O}_3}$. Последнее наблюдалось также в [13, 14]. По мнению авторов работы [13], определяющую роль в развитии процесса воспламенения играют структурно-кристаллические переходы в пленке окисла, в результате чего возникает концентрация дефектов структуры в защитном слое и увеличивается его диффузионная проницаемость. В [15] при индуктивном нагреве частиц с $d = 3 \div 4$ мм со скоростью $380 - 700 \text{ K/c}$ установлено, что $T_* = 2050 \text{ K}$. В [16] при нагреве сферических частиц Al с $d = 0,4 \div 1,2$ мм в пучке CO_2 -лазера с темпом нагрева $\sim 10^4 \text{ K/c}$ получено $T_* = 2070 \pm 50 \text{ K}$. Микрокиносъемка показала, что воспламенение связано не с расплавлением окисной пленки, а является следствием нарушения ее целостности за счет термомеханических напряжений в процессе нагрева.

Температура воспламенения магния связана с температурами фазовых переходов металла, при достижении которых скачком изменяется скорость окисления. Так в [17] при очень медленной скорости нагрева частиц с $d = 3$ мм в индукционной печи получено минимальное значение $T_* = T_{\text{кип}}^{\text{Mg}} = 923 \text{ K}$. С повышением интенсивности нагрева частиц T_* увеличивается. Это не противоречит экспериментально наблюдаемому в [18] росту T_* с уменьшением размера частиц. Достаточным условием воспламенения частицы магния считается достижение ею температуры кипения металла ($T_{\text{кип}}^{\text{Mg}} = 1368 \text{ K}$).

Учитывая приведенные выше данные, значения τ_* вычисляли для Al при $T_* = 2300, 2050$ и 1300 K , для Mg при $T_* = 1368 \text{ K}$. Сплошные кривые на рис. 4 и 5 получены по формуле (1) при упрощающем предположении, что $T_{s2} = T_0 = 290 \text{ K}$, штриховые соответствуют расчету по выражениям (1) — (3) с учетом конвективного нагрева частицы за время скоростной релаксации в проходящей и отраженной УВ. Из рис. 5 следует, что для частиц Mg наблюдается удовлетворительное совпадение экспериментально полученных τ_{ig} с вычисленными τ_* при $T_* = 1368 \text{ K}$. Для частиц Al наиболее хорошее соответствие между измеренными τ_{ig} и расчетными τ_* имеет место при $T_* = 1820 \text{ K}$ (см. рис. 4). Кроме того, простые оценки показывают, что в условиях наших опытов темп нагрева сферической частицы с $d = 4$ мкм $\sim 10^7 \text{ K/c}$. Поэтому в соответствии с [15, 16] можно предположить, что механизм воспламенения частиц Al связан с разрушением окисной пленки под действием механических напряжений, возникающих при высокой интенсивности нагрева частиц.

Удовлетворительное количественное совпадение измеренных τ_{ig} со значениями τ_* , вычисленными при упрощающем предположении $T_{s2} = T_0 = 290 \text{ K}$, позволяет использовать выражение (1) при оценке периода задержки воспламенения металлических частиц.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при оценке периода задержки самовоспламенения частиц алюминия и магния в атмосфере чистого кислорода за отраженной УВ в диапазоне $T = 1000 \div 2000 \text{ K}$, $p = 1 \div 3 \text{ МПа}$ достаточно учитывать в процессе теплообмена между частицей и средой только теплопроводность среды.

В описываемых экспериментах обнаружен также эффект воспламенения отдельных частиц Al при температурах среды, значительно меньших 1800 K (см. рис. 4, темные значки). На рис. 6 приведены типичные фоторазвертки этого процесса. Отметим его характерные особенности: малая доля воспламенившихся частиц. Например, из навески $5 - 7 \text{ мг}$ воспламеняется всего несколько десятков частиц, оценочная масса которых $\sim 10^{-5} \text{ мг}$ (рис. 6, а, б); одновременно воспламеняются частицы разных размеров, в том числе сравнительно крупные; периоды задержки

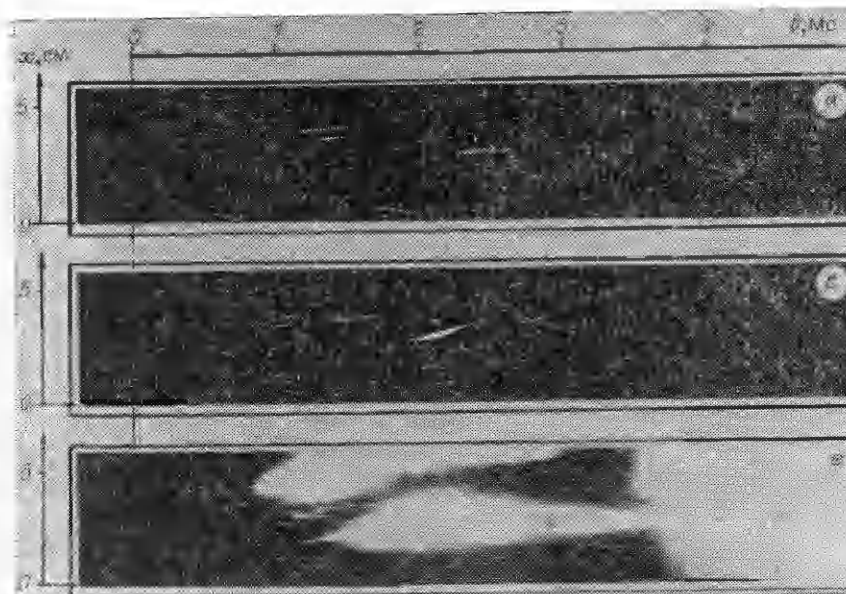


Рис. 6. Воспламенение и горение порошков Al при температурах газа ниже 1800 К. Образец 2, $M = 3$, $T_2 = 1260$ К, $p_2 = 2,5$ МПа, $\Delta t = 200$ мкс.
 m , мг: а) 5, б) 7, в) 10.

воспламенения частиц сравнимы со значениями τ_{ig} вблизи $T = 1800$ К и составляют $0,2 \div 2$ мс (см. рис. 4); наблюдается большой разброс значений τ_{ig} при одинаковых условиях опытов (см. рис. 4); при увеличении концентрации дисперсной фазы отдельные самовоспламенившиеся частицы оказывают поджигающее действие и приводят к воспламенению всего облака газозвеси (см. рис. 6, в).

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. и др. Хим. физика, 1983, 2, 8, 1127.
2. Fox T. W., Te Velde J. A., Nicholls J. A. // Proc. 25th Heat Transfer and Fluid Mech. Inst.—Stanford, Calif., 1976.
3. Fox T. W., Rackett C. W., Nicholls J. A. // Proc. 11th Intern. Shock Tubes and Waves Symp.—Seattle, 1978.
4. Рыжик А. Б., Юрманов Ю. А., Лимонов Б. С. и др. // Физика аэродисперсных систем.—1973.—Вып. 9.
5. Рыжик А. Б., Юрманов Ю. А., Лимонов Б. С. и др. // Предупреждение внезапных воспламенений порошков и взрывов газодисперсных систем.—Киев: Наук. думка, 1975.
6. Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В. // Proc. 1st Intern. Colloq. on Explosibility of Industrial Dust, Varanow, 1984.—Warszawa, 1985.—Pt 2.
7. Бойко В. М., Папырин А. Н. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем.—Черноголовка, 1986.
8. Бойко В. М., Карнаухов А. А., Косарев В. Ф. и др. ПМТФ, 1982, 3, 64.
9. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. акад. И. К. Кирилова.—М.: Атомиздат, 1976.
10. Соу С. Гидродинамика многофазных систем.—М.: Мир, 1971.
11. Friedman R., Masek A. Comb. Flame, 1962, 6, 1, 9.
12. Гуревич М. А., Лапкина К. И., Озеров Е. С. ФГВ, 1970, 6, 2, 172.
13. Гуревич М. А., Озеров Е. С., Юринов А. А. ФГВ, 1978, 14, 4, 50.
14. Афанасьев С. Н., Жарков В. Ю., Озеров Е. С. // Физика аэродисперсных систем.—1985.—Вып. 27.
15. Деревяга М. Е., Стесик Л. П., Федорин Э. А. ФГВ, 1977, 13, 6, 852.
16. Ермаков В. А., Раздобреев А. А., Скорик А. И. и др. ФГВ, 1982, 18, 2, 141.
17. Деревяга М. Е., Стесик Л. П., Федорин Э. А. ФГВ, 1978, 14, 6, 44.
18. Ежовский Г. К., Озеров Е. С. ФГВ, 1977, 13, 6, 845.

Поступила в редакцию 29/X 1987,
 после доработки — 23/II 1988