

12. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 498.
 13. Г. И. Марчук. Вычислительные методы. Новосибирск, «Наука», 1969.
 14. Ю. Ш. Матрос, В. А. Кириллов, М. Г. Слинко. Моделирование химических процессов и реакторов. Тр. конф. Химреактор-4. Новосибирск, 1971.

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИСКРОВОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

А. Б. Рыжик

(Ленинград)

В отличие от гомогенных смесей вопросам зажигания аэрозолей электрической искрой уделялось недостаточное внимание, и закономерности протекания этого процесса в газодисперсных системах оказались практически не выясненными.

В настоящей работе рассматриваются особенности искрового зажигания порошков алюминия, магния и их сплава (50/50) в различных по составу азотно-кислородных взвесях. Частицы имели сферическую форму и размер до 40 мкм; в качестве краткой характеристики распределений использовался среднеобъемный диаметр d .

Опыты проводились в герметичной взрывной камере прямоугольного сечения объемом 4 л (рис. 1). Порошок распылялся виброситовым дозатором [1], установленным над заостренными вольфрамовыми электродами. Для управления разрядом и синхронизации измерительной системы применялся водородный тиратрон, включенный последовательно с искровым промежутком. При подаче управляющего напряжения на сетку тиратрона происходил разряд вспомогательного конденсатора, сопровождающийся повышением разности потенциалов на электродах (до пробоя оба электрода находились под одинаковым потенциалом), и в конечном итоге — разрядом основного конденсатора емкостью C с заданной энергией

$$E = 0,5C(U_0^2 - U_K^2), \quad (1)$$

где U_0 , U_K — напряжение на обкладках конденсатора до и после разряда.

Для определения энергии, действительно выделяющейся в разряде, использовался прием графического интегрирования осциллограмм напряжения и расчетных эпюр тока [2]. Напряжение регистрировалось оптико-электрическим способом при помощи ячейки Поккельса; в качестве источника линейно-поляризованного света применялся гелий-неоновый лазер. Осциллографические исследования показали, что потери в разрядном контуре малы (не более 5—10%) и, таким образом, расчет по соотношению (1) оправдан. Согласно рекомендациям [1], за минимальную энергию зажигания E_{min} принималась энергия, соответствующая вероятности воспламенения

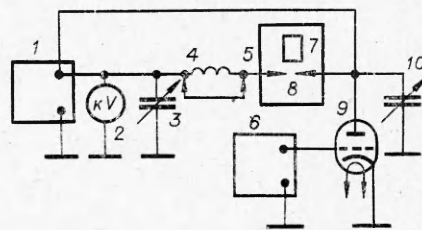


Рис. 1. Принципиальная схема установки.
 1 — блок питания; 2 — киловольтметр; 3 — основной конденсатор; 4 — катушка индуктивности; 5 — взрывная камера; 6 — блок синхронизации и регистрации напряжения; 7 — дозатор; 8 — электроды; 9 — тиратрон; 10 — вспомогательный конденсатор.

$P_b = 0,01$ при оптимальных значениях индуктивности, массовой концентрации твердой фазы μ и длины $S_{кр}$ разрядного промежутка.

Известно [3], что горение взвесей можно рассматривать как горение гомогенной смеси, но с учетом закономерностей реакций на частицах. Из обзора тепловых моделей воспламенения от искры [4] следует, что ни одна из них не может претендовать на универсальность. При обработке результатов в настоящей работе использована модель Зельдовича [5] как физически наиболее наглядная и получившая широкое распространение. В соответствии с [5] воспламеняющее количество тепла должно быть достаточным для нагрева до температуры горения шарового объема с радиусом порядка ширины зоны распространяющегося пламени $\delta_{пл}$, т. е. в критических условиях ($E = E_{мин}$, $S = S_{кр}$)

$$E_{мин} = \frac{\pi}{6} S_{кр}^3 \rho_{bг} Q c'_{ок} \sim (T_b - T_u) c_{pсм} \rho_{bсм}; \quad (2)$$

$$c_{pсм} \rho_{bсм} = (c_{pг} \rho_{uг} + c_{pс} \mu) T_u / T_b (1 - c_{ок}),$$

где Q — тепловой эффект реакции металла с кислородом на единицу массы кислорода; $c'_{ок}$ $c_{ок}$ — соответственно относительная массовая и объемная концентрация кислорода; c_p , ρ — удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность; T_b — равновесная температура во фронте горения. Индексы u , b , $г$, $см$, s относятся соответственно к начальным условиям, реакционной зоне, газу, взвеси и частицам.

Из анализа (2) следует, что при $Q = const$ влияние $c_{ок}$ на $\eta = E_{мин}/S_{кр}^2$ не должно быть сильным вследствие слабой зависимости величин $(T_b - T_u)/T_b(1 - c_{ок})$ и $c_{pг}$ от $c_{ок}$. В результате обработки экспериментальных данных (рис. 2) установлено, что до определенных (критических) значений концентрации кислорода $c_{кр}$ его влияние на η действительно мало, и зажигание в этих условиях, по-видимому, контролируется реакцией окисления. Переход от $c_{кр}$ к предельным концентрациям $c_{пр}$ (при которых еще возможно распространение пламени) сопровождается резким изменением зависимости $\eta(c_{ок})$ для сплава и магния, свидетельствующим о снижении тепловыделения (связанного с уменьшением Q) и возрастании роли азотирования. Поскольку реакция алюминия с азотом сильно затруднена, значения $c_{кр}$ и $c_{пр}$ для взвесей этого металла совпадают. Напротив, для магния эти величины оказываются меньше, чем для сплава и алюминия, а переход от $c_{кр}$ к $c_{пр}$ более плавным. Отметим, что данные, относящиеся к критическим условиям самовос-

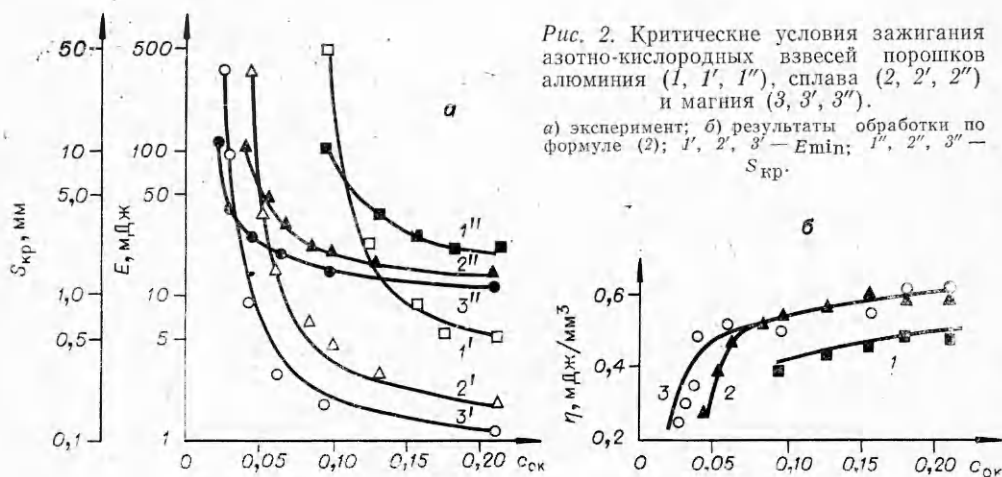
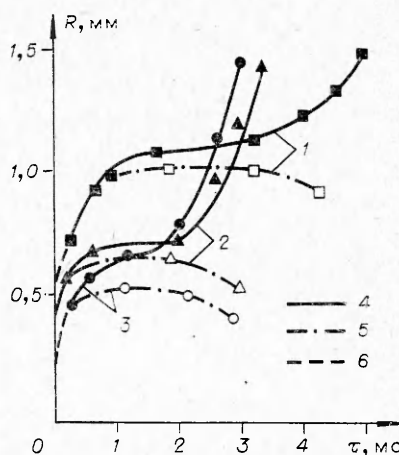


Рис. 2. Критические условия зажигания азотно-кислородных взвесей порошков алюминия (1, 1', 1''), сплава (2, 2', 2'') и магния (3, 3', 3'').

а) эксперимент; б) результаты обработки по формуле (2); 1', 2', 3' — $E_{мин}$; 1'', 2'', 3'' — $S_{кр}$.

Рис. 3. Начальная стадия распространения пламени в аэрозолях алюминия (1), сплава (2) и магния (3).

4 — распространяющаяся пламя; 5 — затухающее пламя; 6 — область значений R , неразрешаемых во времени.



пламенения, изученным ранее в [6], и искрового зажигания качественно похожи.

С целью сопоставления экспериментальных значений η с теоретическими η_r методом скоростной кино съемки (камера СКС-1М) изучались закономерности развития очага пламени при зажигании воздушных взвесей искрой с параметрами, близкими к критическим.

Для увеличения изображения объектив выдвигался вперед с помощью насадочных колец и съемка велась на близком расстоянии. Условия постоянства давления выполнялись, поскольку использовался только начальный период развития пламени. Сразу же после возникновения пламя имело цилиндрическую форму, однако спустя ~ 200 мкс его распространение было практически изотропным. Критический радиус ядра $R_{кр}$ (рис. 3) определялся в момент времени, когда наблюдалось первое различие в скоростях затухающего и развивающегося пламени [7]. Это время оказалось больше, чем для газовых смесей [7], и возрастало при переходе от магния к алюминию. Развитие очага пламени в аэрозолях металлов вблизи предела представляет собой редкий случай, когда горение происходит в основном за счет теплопроводности и лучистой теплопередачи можно пренебречь.

Непосредственно это следует из сравнения кондуктивной и радиационной составляющих теплового потока от сферического пламени. В соответствии с [8, 9] выражение для безразмерного критерия Π , характеризующего механизм теплообмена, может быть записано в виде

$$\Pi = Re\sigma T_b^4 [1 - \exp(-R/L)] / \lambda (T_b - T_u).$$

При $R/L \ll 1$ эта формула существенно упрощается:

$$\Pi \approx R^2 \epsilon \sigma T_b^4 / L \lambda (T_b - T_u),$$

где \bar{R} — радиус шарика пламени; σ — постоянная Стефана — Больцмана; ϵ — степень черноты излучения; λ — теплопроводность газа; $L = 1/2\pi n r^2$ — длина пробега луча в дисперсной поглощающей системе; r — радиус частицы; n — число частиц в единице объема.

В качестве примера проведем оценочный расчет для аэровзвеси алюминия и положим $R = R_{кр} = 0,1$ см, $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $r = 7 \cdot 10^{-4}$ см, $T_u = 300$ К, $T_b = 2570$ К [10], $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-4}$ кал/(см·с·град). При $\sigma = 1,365 \cdot 10^{-12}$ кал·см²/(с·град⁴) и $\epsilon = 0,3$ получаем $\Pi \approx 0,2$, т. е. влияние излучения в данном случае действительно оказывается слабым.

Значительная длительность существования практически не развивающегося, но не погасающего пламени в аэрозолях, по-видимому, связана со слабой температурной зависимостью скорости диффузионного горения и большой тепловой инерцией ядра, обусловленной его высокой объемной теплоемкостью [9, 11].

В [12] показано, что при горении взвесей с кондуктивной теплопередачей зона реакции δ_r не узка по сравнению с зоной прогрева δ_p , а температура газа T_i на границе зоны реакции выше температуры

К расчету критических условий зажигания аэрозолей

Материал частиц	d , мкм	k , мм ² /с	Q , кал/г	T_b , К	v_b , см/с	$\frac{S_{кр}}{\delta_p}$	$\frac{S_{кр}}{\delta_{пл}}$	η/η_T
Алюминий	14	0,22 [23]	8300	2570 [10]	27	3,2	1,05	0,70
Магний	17	2,8 [13]	9000	2720 [10]	100	3,9	1,47	0,83
Сплав	16	2,14 [13]	8600	2620	90	3,8	1,52	0,81

воспламенения частицы T_{si} . Согласно [5, 12],

$$\delta_p = \tau_b v_b, \quad \delta_{пл} = \lambda_i / c_{p_i} \rho_{b_i} v_b, \quad \tau_b = \pi d^2 / k, \quad (3)$$

где v_b — видимая скорость распространения пламени; k , τ_b — константа скорости и время горения частицы. Индексом i помечены параметры, относящиеся к T_i .

Ввиду неопределенности величины T_i расчет $\delta_{пл}$ проводился при $T_i = 1300 \text{ К} > T_{si}$. Скорость горения определялась дифференцированием кривых $R(\tau)$ (см. рис. 3), и в качестве v_b принимались значения, соответствующие практически стационарному участку $v_b(\tau)$, для которого лучшей теплопередачей еще можно было пренебречь; величина η , рассчитывалась по (2) с использованием Q .

Из анализа результатов расчета (см. таблицу) следует, что в аэрозольных системах $S_{кр}/\delta_p \approx 3,6$, а $S_{кр}/\delta_{пл} \approx 1,3$, т. е. почти в 6 раз меньше, чем для газов. Поскольку гашение аэрозольных пламен в результате теплоотвода в твердые поверхности более затруднено, оно должно сильнее зависеть от размера и формы этих поверхностей, т. е. при замене точечных электродов фланцами [14] критический зазор должен увеличиться. К сожалению, экспериментальная проверка этого положения связана с большими трудностями из-за нарушения распределения концентрации твердых частиц в искровом зазоре и их воспламенения на поверхности электродов.

Таким образом, в принципе при $S = S_{кр}$ отношение $S_{кр}/\delta_{пл}$ может приобретать различные значения в зависимости от свойств горючей системы и условий, определяющих баланс между теплом, получаемым горячей сферой и отводимым от ее поверхности. Учитывая сильную зависимость $\eta(S_{кр})$, можно предположить, что некоторое уменьшение η по сравнению с η_c вызвано небольшим завышением $S_{кр}$ в эксперименте. Последнее непосредственно подтверждается фотографическими исследованиями, согласно которым $S_{кр} > 2R_{кр}$ (см. рис. 2, 3). Поскольку потери энергии в электроды возрастают с увеличением длительности формирования ядра пламени и уменьшением искрового зазора [14], для медленно горящих систем завышение величины $S_{кр}$ может быть более значительным. С этих позиций уменьшение η/η_c для алюминия по сравнению с магнием и сплавом имеет четкий смысл.

Автор благодарит В. С. Махина за полезные обсуждения и В. Н. Китуцу и В. В. Ильина за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
5/VIII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Монахов. Методы исследования пожарной опасности веществ. М., «Химия», 1972.
2. И. С. Абрамсон, Г. М. Гегечкори. ЖЭТФ, 1951, 21, 4, 484.
3. О. И. Лейпунский. ЖФХ, 1960, 24, 1, 177.
4. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
5. Я. Б. Зельдович, Н. Н. Симонов. ЖФХ, 1949, 23, 11, 1361.

6. А. Б. Рыжик и др.— В сб.: Проблемы горения и тушения пожаров. М., ВНИИПО МВД СССР, 1975, 133.
7. D. R. Linton, E. R. Wooding. Brit. J. Appl. Phys., 1959, 10, 159.
8. Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
9. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер и др.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
10. Б. М. Злобинский, В. Г. Иоффе, В. Б. Злобинский. Воспламеняемость и токсичность металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972.
11. В. И. Лисицын, А. А. Пироженко, В. Н. Виллюнов.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
12. Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. Докл. АН СССР, 1971, 201, 1, 144.
13. В. И. Глухов, В. И. Гнатовский.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 5. Киев. Гос. ун-т, 1971.
14. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ГРАФИТА

А. Г. Захаров, Б. С. Фиалков

(Караганда)

Имеющиеся схемы распределения продуктов горения вблизи горящего графитового образца [1] предполагают плавное уменьшение с расстоянием концентрации СО и СО₂ и такое же увеличение О₂. Однако детали этого распределения, представляющего особый интерес в связи с изучением кинетики процесса горения и влияния на него внешних воздействий, нуждаются в уточнении.

В настоящей работе изучалось распределение состава продуктов горения спектрально-чистого графитового электрода марки С-3. Цилиндрический образец диаметром 6 мм помещался в печь (рис. 1), нагретую до 1200 К. Анализ продуктов горения производился на хроматографе «Хром-4». Проведено три серии экспериментов, в которых образец находился под собственным потенциалом [2] или под внешним, равным ±300 В. Идентичность состояния образца при отборе проб контролировалась по его температуре и величине электрического потенциала, так как последний стабилизируется значительно позже температуры и более тонко реагирует на изменение внешних условий [2, 3]. Пробы отбирались через кварцевый капилляр с внутренним диаметром 0,2 мм. Перед отбором капилляр промывался газом-носителем, что предотвращало искажение результатов анализа остатками предыдущей пробы. Микрометрический винт перемещал капилляр относительно образца с точностью до 0,1 мм. Скорость движения газа в капилляре при отборе пробы на анализ составляла около 2 м/с, что соизмеримо со скоростью движения газа в реакционной зоне. Последнее позволяет исключить опасения в искажении профиля концентраций при анализе. Кроме того, для проверки действенности метода в ходе предварительных исследований на газовых пламенах показана практическая идентичность распределений концентраций по сечению пламени, получаемых спектрометрическим и хроматографическим методами.

В ходе экспериментов установлено, что распределение СО₂ и О₂ вблизи находящегося под собственным потенциалом образца (рис. 2) отличается от опубликованных данных [1], а для СО таких отличий не наблюдается. Распределение концентрации СО₂ имеет два максимума