

9. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: — Л.: Химия, 1982.
10. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Борисов А. А. // Простая модель детонации в системе газ — пленка с учетом механического уноса горючего // ФГВ.— 1985.— 21, № 1.— С. 110.
11. Borisov A. A., Mailkov A. E., Kosenkov V. V. et al. // Propagation of gaseous detonations over liquid layers // Proc. 12th ICDERS. Book of Abstracts, 1989.— Michigan.

г. Москва

Поступила в редакцию 24/1 1991

УДК 534.222.2 + 537.311.37

А. В. Пинаев

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВ СО ВЗВЕСЯМИ АЛЮМИНИЯ

В работе проведены измерения проводимости при детонации газовзвесей $(\text{H}_2 + \text{O}_2) - \text{Al}$ и $\text{O}_2 - \text{Al}$. Опыты выполнены в ударной трубе при начальных давлениях $p_0 = 0,2 \div 0,6$ атм и средней объемной плотности пыли $\rho = 0,1 \div 0,5$ кг/см³. Высокая проводимость $\sigma = 10^{-2} \div 1$ См/м существует в протяженной области горячих продуктов реакции и имеет термическую природу.

Газовзвеси органических и металлических пылей обладают способностью к детонации. Наиболее полно изучены вопросы, касающиеся структуры и свойств взрывных и детонационных волн во взвесах углей [1, 2], муки и крахмала [3—5] в воздухе, O_2 или смесях $\text{O}_2 - \text{N}_2$, а также металлических частиц Al в O_2 , воздухе или детонационно-способных газовых смесях [6—9]. Цель настоящего исследования — выяснить величину электропроводности продуктов детонации таких систем (результаты, приводимые ниже, получены автором в 1986 г.).

Эксперименты выполнены на ударной трубе из нержавеющей стали диаметром $d_1 = 70$ мм и длиной 7 м. Детонация возбуждалась с помощью двух метровых секций, расположенных диаметрально противоположноверху трубы. Эти секции отделялись диафрагмой от ударной трубы, вакуумировались и заполнялись смесью $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2$ при $p_0 = 1 - 2$ атм. Снизу по центру трубы помещался электроизолированный от всей трубы проводник из нержавеющей стали с $d_2 = 6$ мм. Ударная труба перед опытом вакуумировалась. Затем газовая смесь подавалась через электроклапаны в заполненный порошком алюминия ПАП-1 генератор пыли (рис. 1), откуда образующаяся газовзвесь поступала сверху в объем трубы. При таком способе равномерное заполнение трубы исследуемой газовзвесью до $p_0 \leq 0,5$ атм и $\rho \leq 0,5$ кг/м³ обеспечивалось за 5—10 с. Величина ρ однозначно зависела от p_0 и определялась отдельно путем взвешивания осевшего из объема трубы порошка. Порошок ПАП-1 представлял собой тонкие (~ 1 мкм) бесформенные чешуйки с размерами 1—40 мкм.

Электропроводность продуктов детонации измеряли по методике, описанной в [10—12]. Величину электропроводности рассчитывали по формуле $\sigma = k_d (u_d - u_d^0) \ln(d_1/d_2) (2\pi U_0 D)^{-1}$, где U_0 — напряжение на центральном электроде; k_d , u_d , u_d^0 — соответственно калибровочный коэффициент датчика и напряжения на нем при $U_0 > 0$ и $U_0 = 0$. В этой формуле в отличие от [10, 11] учтен нулевой сигнал u_d^0 . Временное разрешение метода составляло 0,2 мкс, пространственное — 0,2 мм. Методика измерения скорости детонации D , давления p , свечения J не отличалась от описанной в [12], погрешности измерения давления и электропроводности не превышали 20 %, скорости детонации — 0,5 %.

Для выяснения сравнительного вклада в проводимость частиц выбрана газовая смесь $\text{H}_2 + \text{O}_2$ с избыточным после реакции O_2 (при нор-

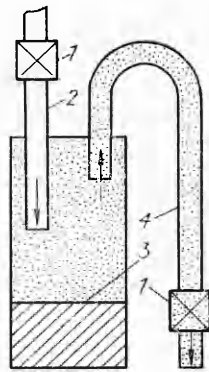


Рис. 1. Устройство генератора пыли. 1 — электроклапан; 2 — трубка подачи газа; 3 — алюминиевая пудра; 4 — трубка выхода газовзвеси.

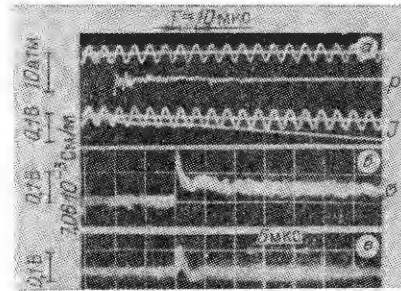


Рис. 2. Осциллограммы давления, свечения и проводимости при детонации $H_2 + O_2$; $p_0 = 0,4$ атм, $D = 2345$ м/с, $U_0, B = 30$ (б), 0 (в).

мальных начальных условиях расчетные детонационные параметры [13]: $D = 2320$ м/с, температура $T_{ч.-ж.} = 3468$ К, $p_{ч.-ж.} = 17,81$ атм (Ч.—Ж.—плоскость Чепмена — Жуге, измеренная $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-3}$ См/м [12]). Осциллограммы p , J , σ в волне детонации $H_2 + O_2$ приведены на рис. 2. Экспериментальные D и p близки к расчетным, профиль σ практически прямоугольный (получается вычитанием нулевого сигнала (рис. 2, в) из сигнала на рис. 2, б), поскольку отсутствует химиионизация в зоне реакции, а температура за плоскостью Чепмена — Жуге постоянна [12]. Само существование нулевого сигнала свидетельствует о наличии объемного заряда во фронте детонации благодаря диффузии электронов из области электронейтральной плазмы. При детонации всех исследованных в работе типов систем осциллограммы нулевого сигнала подобны приведенным на рис. 2, в — длительность ≈ 5 мкс, а относительная амплитуда, убывая с ростом σ , составляет от нее 20—50 %.

Добавка взвеси частиц Al к смеси $H_2 + O_2$ слабо влияет на величину скорости детонации, но заметно (на 30—40 %) возрастает давление в волне и на 1—2 порядка — свечение и электропроводность (рис. 3). Воспламенение частиц Al происходит практически во фронте волны, явно выраженная двухволновая структура здесь не реализуется. В исследованном диапазоне начальных параметров пропорционально p_0 и ρ растут J и σ . Для грубой (с точностью 20—30 %) оценки электропроводности можно пользоваться эмпирической зависимостью $\sigma = \sigma^* p_0 \bar{\rho} / (p_0^* \bar{\rho}^*)$ ($\sigma^* = 7,5 \cdot 10^{-2}$ См/м, $p_0^* = 0,4$ атм, $\bar{\rho}^* = 10^{-1}$ кг/м³). Электропроводность во фронте резко возрастает (как и при газовой детонации) вследствие протекания эндотермических реакций, что отличает ее от случая ударных волн, где профиль σ плавный и пологий. Высокая проводимость регистрируется уже во фронте волны, и в опытах с $\bar{\rho} \geq 0,25$ кг/м³ наблюдается постепенное ее увеличение (рис. 3, г). При малых $\bar{\rho}$ профиль проводимости прерывистый из-за неоднородности газовзвеси, с ростом $\bar{\rho}$ профиль σ становится более равномерным (рис. 3, б — г).

Практически постоянная σ при детонации газовзвесей, как и в $H_2 + O_2$, свидетельствует о термической природе ионизации. В волнах детонации одновременно с p_0 повышается и температура T продуктов реакции, в итоге зависимость $\sigma(T)$ оказывается более сильной, чем $\sigma(p)$: при равновесной (термической) ионизации $\sigma = en_e \mu_e \sim T^\alpha \left(\sum_i p_i Q_i \right)^{-1} \times \exp(\varphi/T)$ возрастает с T , а μ_e убывает вместе с p (e , n_e , μ_e — заряд, концентрация и подвижность электронов, $\alpha > 0$, $\varphi > 0$, p_i , Q_i — давление и среднее электронное диффузионное сечение столкновения для нейтральных частиц).

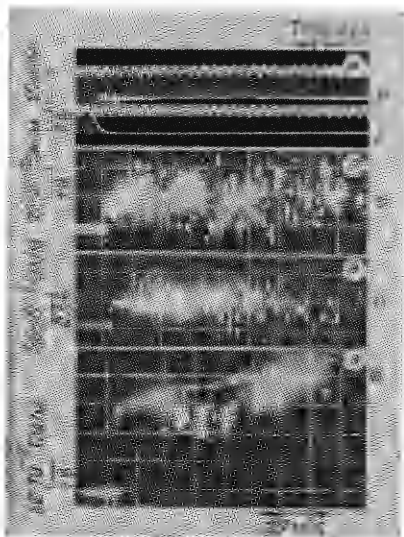


Рис. 3. Осциллограммы давления, свечения и проводимости при детонации $(\text{H}_2 + \text{O}_2) - \text{Al}$.

$p_0 = 0,4$ (а, б), $0,2$ (в), $0,38$ атм (з); $\rho = 0,085$ (а, б), $0,1$ (в), $0,32$ кг/м³ (з); $D = 2335$ (а, б), 2336 (в), 2330 м/с (з).

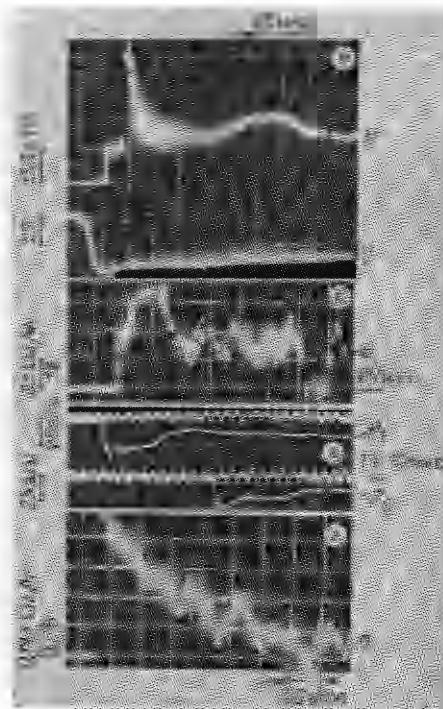


Рис. 4. Осциллограммы давления, свечения и проводимости при детонации $\text{O}_2 - \text{Al}$.
 $p_0 = 0,48$ (а, б), $0,55$ атм (в, з); $\rho = 0,37$ (а, б), $0,27$ кг/м³ (в, з); $D = 1600$ (а, б), 1750 м/с (в, з).

В газовзвесьях $\text{Al} - \text{O}_2$ зарегистрированы волны детонации с $D = 1600 \div 1750$ м/с, слабо зависящими от ρ ($p_0 = 0,4 \div 0,6$ атм, $\rho = 0,2 \div 0,5$ кг/м³, $\kappa = \kappa/\kappa_{\text{ст}} \approx 0,3 - 0,55$, κ — стехиометрический коэффициент, $\kappa_{\text{ст}} = 1,125$). Задержка воспламенения частиц Al не превышает $5 - 10$ мкс. В большинстве опытов реализуется спиновая детонация с шагом спина ≈ 25 см и периодом вращения «головы» $\approx 140 - 150$ мкс. Прохождение через пьезодатчик поперечной волны с перепадом давления $p/p_0 \approx 125$ зарегистрировано на рис. 4, а (профиль σ в том же опыте — рис. 4, б). Как и в $(\text{H}_2 + \text{O}_2) - \text{Al}$ σ достигает высоких значений ($\approx 0,35 - 0,6$ См/м) на фронте одновременно с воспламенением частиц, в зоне реакции профиль σ местами прерывистый (рис. 4, б, з). По мнению автора, наблюдаемый спад сигнала (см. рис. 4, б, з) связан с конденсацией Al_2O_3 в объеме (что уменьшает σ) и на обоих электродах (что увеличивает контактное сопротивление). Косвенным подтверждением этому служит осмотр после опыта поверхностей трубы и центрального электрода. Для сравнения заметим, что в случае детонации $(\text{H}_2 + \text{O}_2) - \text{Al}$ осевший слой Al_2O_3 при тех же ρ значительно тоньше.

За падающей ударной волной в кислороде при $D = 1600 \div 1750$ м/с $T \approx 1500 \div 1700$ К, что существенно ниже, чем в продуктах детонации $\text{H}_2 + \text{O}_2$. Несмотря на двукратное различие температур перед воспламенением и протяженный (несколько сантиметров) размер зоны реакции в $\text{O}_2 - \text{Al}$ с плавно нарастающей температурой значения σ в $(\text{H}_2 + \text{O}_2) - \text{Al}$ и $\text{O}_2 - \text{Al}$ при близких ρ и парциальных начальных давлениях кислорода $p_0(\text{O}_2)$ оказываются сравнимыми. Это позволяет предполагать, что степень ионизации и электропроводность определяются величиной ρ и локальной (вблизи частиц) температурой, зависящей от $p_0(\text{O}_2)$. На основании этого эмпирического факта, можно ожидать, что при детонации Al в воздухе значения $\sigma_{\text{возд}}$ будут при прочих равных условиях примерно в 5 раз ниже, чем в кислороде (например, для $\rho \approx 0,3$ кг/м³ и $p_0 = 1$ атм $\sigma_{\text{возд}} \approx (0,35 \div 0,6) \cdot 2/5 \approx 0,15 \div 0,25$ См/м).

В заключение сделаем выводы.

Взвеси А1 позволяют повысить проводимость детонационно-способных смесей на 1—2 порядка ($\bar{\rho} \approx 0,5 \text{ кг/м}^3$). Высокая проводимость достигается одновременно с воспламенением частиц А1 и сохраняется в протяженной области за фронтом детонации, что свидетельствует о термической природе ионизации. С увеличением начального давления и объемной плотности пыли в продуктах детонации газовзвесей могут быть получены $\sigma > 10^{-2} \div 1 \text{ См/м}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эдварс Д., Ферилей Р., Неттлтон М. Исследование детонации взвесей угольной пыли в смесях кислорода с азотом в ударной трубе // ФГВ.— 1987.— 23, № 2.— С. 129—136.
2. Zalesinski M., Wojcicki S. Generation of detonation by two-stage burning. Gasdynamics of detonations and explosions/Eds. J. R. Bowen et al. // Progr. Astron. and Aeron.— 1981.— 75.— P. 439—446.
3. Peraldi O., Veysiere B. Experimental study of detonations in starch particle suspensions with O_2/N_2 , H_2/O_2 , and $\text{C}_2\text{H}_4/\text{O}_2$ mixtures. Dynamics of explosions/Eds. J. B. Bowen et al. // Ibid.— 1986.— P. 490—504.
4. Dahab O. M., Kapuscinski M., Wolanski P. et al. Detonation phenomena in grain dust-oxygen mixtures // 4th (Int.) colloq. on dust explosions: Book of abstracts.— Warszawa, 1990.— P. 67.
5. Wolanski P., Sacha W., Zalesinski M. Effect of dust concentration on defonation parameters in grain dust — air mixtures // Ibid.
6. Strauss W. A. Investigation of the detonation of aluminium powder-oxygen mixtures // AIAA J.— 1968.— 6, № 9.— P. 1753—1756.
7. Tulis A. J., Selman J. R. Detonation tube studies of aluminium particles dispersed in air // 19th Symp. (Int.) on Comb.— Pittsburgh, 1982.— P. 655—668.
8. Tulis A. J., Fochtman E. G., Heberlein D. C. Experimental methods for assesing detonation/deflagration in pyrotechnic dusts // 7th (Int.) pyrotechnics seminar, IIT Research Inst.— 1980.— 2.— P. 859—877.
9. Veysiere B. Structure of the detonations in gaseous mixtures containing aluminium particles in suspension. Dynamics of explosions/Eds. J. R. Bowen et al. // Progr. Astron. and Aeron.— 1986.— P. 490—504.
10. Ершов А. П., Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Измерение ширины зоны проводимости за детонационным фронтом в тэне // Динамика сплошной среды.— Новосибирск, 1971.— Вып. 8.— С. 177—182.
11. Ершов А. П. О методах измерения электропроводности за фронтом детонации в конденсированных ВВ // Там же.— Новосибирск, 1972.— Вып. 11.— С. 17—27.
12. Пинаев А. В., Сычев А. И. Измерение профилей электропроводности и процессы ионизации при детонации газов // ФГВ.— 1984.— 20, № 1.— С. 112—121.
13. Николаев Ю. А., Топчийн М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Там же.— 1977.— 13, № 3.— С. 393—404.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 8/1 1991

УДК 662.215 + 534.222

Е. Г. Баранов, И. И. Клочко, Э. А. Петелин

О РАЗЛЕТЕ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА В ГАЗОКУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДАХ

Явление кумуляции энергии взрывчатого превращения ВВ получило широкое применение в промышленности. В качестве примера можно привести кумулятивные заряды для геофизических работ [1], для дробления скальных массивов в условиях противодавления [2], заряды для дробления негабаритных кусков горных пород [3, 4], а также скважинные и накладные заряды с направленным истечением продуктов взрыва [5, 6], газокумулятивные заряды для ускорения твердых частиц [7] и сверхскоростной кумуляции [8].

В зависимости от конструкции заряда выделяют кумуляцию газовых и газометаллических потоков. Последняя обеспечивается зарядами с металлической облицовкой. Обусловленные практическим приложением научные исследования ориентированы на изучение кумуляции с металлической облицовкой, так как последняя позволяла наиболее просто уве-