

ДЕТОНАЦИЯ В ВАКУУМ-ВЗВЕСИ ВТОРИЧНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. В. Пинаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально показано существование самоподдерживающейся детонации в вакуумированной взвеси частиц вторичного взрывчатого вещества. Опыты проведены с октогеном в вертикальной ударной трубе диаметром 0,07 м и длиной 7 м в диапазоне среднеобъемных концентраций частиц $0,32 \div 0,92$ кг/м³. Установлено, что скорость вакуумной детонации практически не зависит от среднеобъемной концентрации частиц и составляет (1750 ± 50) м/с, профиль давления волны вакуумной детонации плавный. Приведены данные об электропроводности продуктов вакуумной детонации и длине зоны реакции.

1. Изучению детонации газовых и гетерогенных систем, плотных и смесевых взрывчатых веществ (ВВ), газозвесей унитарных топлив (среда находится при ненулевом начальном давлении, окислитель в гетерогенных системах обычно входит в состав газовой фазы) посвящены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования. Гораздо меньше работ по исследованию вакуумной детонации низкоплотных унитарных топлив и ВВ, когда в отличие от указанных выше систем самоподдерживающийся процесс осуществляется при разложении вещества в отсутствие газообразного окислителя перед фронтом детонации.

В [1, 2] впервые экспериментально получена и изучена детонация в вакуумированной пористой среде с равномерным тонким слоем гексогена или тротила на инертных частицах при низких среднеобъемных концентрациях ВВ ($\rho = 5 \div 40$ кг/м³). В [1, 3] показано, что поджигание ВВ осуществляется по безударному механизму горячими струями, истекающими вперед, а их максимальная скорость близка к скорости детонации и для отдельных струй даже превышает ее на $100 \div 200$ м/с. Профиль давления плавный, без скачка, задержка свечения относительно переднего фронта давления не превышает $10 \div 20$ мкс. Детонация распространяется с постоянной скоростью D от 320 или 640 (на пределе) до 1200 или 450 м/с (при $\rho = 40$ кг/м³) для тротила или гексогена соответственно. С добавлением газа в среду [2] детонация возможна при меньшей, чем в случае вакуума, критической среднеобъемной концентрации ρ^* , при этом для каждого значения $\rho < \rho^*$ существуют максимальный и

минимальный пределы по давлению; для гексогена при уменьшении среднеобъемной концентрации до 3 кг/м³ область существования детонации по начальному давлению сужается вплоть до ее вырождения (при $\rho < 3$ кг/м³ детонация отсутствует при любом давлении).

В [4] исследовано детонационное инициирование частиц первичного ВВ — азида свинца с размером частиц $\approx 10^{-3}$ м и расстоянием между ними $\approx 7 \cdot 10^{-3}$ м, первоначально находящихся на нижней стенке вакуумированной трубки длиной 0,9 м и диаметром $d = 10^{-2}$ м. К трубке через диафрагму присоединялась секция инициирования, заполняемая ацетиленокислородной смесью; подрыв газовой смеси происходил после удара трубки со скоростью 0,32 м/с о верхний жесткий упор в момент, когда частицы ВВ, оторвавшись от стенки, предположительно достигали оси канала. После разрыва диафрагмы зарегистрирована ускоряющаяся взрывная волна со скоростью $D = 2800 \div 3100$ м/с, примерно в два раза превышающей для взвеси PbN₆ скорость детонации Чепмена — Жуге $D_{CJ} \approx 1600$ м/с. Для объяснения конечной наблюдаемой скорости детонации и переходного процесса предложен эстафетный механизм, поскольку отдельные частицы первичного ВВ способны самостоятельно детонировать при слабом инициировании.

В [5] в узких трубках ($d = (2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м) со слоем ВВ на стенках обнаружена вакуумная детонация с неоднородной (спиновой) структурой.

Теоретически и численно задача о распространении детонации в вакуумированной

взвеси ВВ решалась в [6–10] в предположении, что горение начинается при разогреве частиц до температуры воспламенения T_{ign} и протекает в дальнейшем при этой же температуре, скорость выгорания частиц лимитируется скоростью их вынужденной газификации. Для широкого диапазона диаметров и объемных концентраций частиц ВВ определены энергия инициирования и критические размеры области инициирования, обеспечивающие возбуждение плоской, цилиндрической и сферической детонации в вакуум-взвеси частиц гексогена. В отличие от детонации в газозвесах [11–14], структура волны не соответствует модели Зельдовича — Неймана — Дёринга, поскольку головная ударная волна отсутствует, а передний фронт — контактный разрыв; как и для идеальной газовой детонации значение D_{CJ} не зависит от ρ и описывается зависимостью [6]

$$D_{CJ} = [2(\gamma^2 - 1)(1 + C_2\Theta_0)]^{0,5}, \quad (1)$$

где γ — показатель адиабаты; $C_2 = c_2 T_{ign}/q_2$, $\Theta_0 = T_0/T_{ign}$; c_2 , q_2 — соответственно теплоемкость и тепловой эффект химических реакций на единицу массы топлива; T_0 — начальная температура.

Отдельные частицы вторичных ВВ, в отличие от первичных, сгорают плавно в течение более длительного времени, что (вследствие увеличения потерь) может затруднить возбуждение и распространение детонации. Из приведенного обзора работ вытекает необходимость проведения экспериментов для доказательства возможности существования самоподдерживающейся вакуумной детонации во взвеси частиц вторичного ВВ.

2. По предварительной оценке длина зоны реакции при детонации взвеси частиц ВВ может достигать десятков сантиметров [6–10] и для выхода на стационарный режим требуется расстояние по крайней мере в несколько метров. В работе использована вертикальная ударная труба (рис. 1) длиной 7 м и диаметром 0,07 м; инициирующие секции длиной 0,5 м и диаметром 0,05 м располагались симметричноверху трубы и отделялись диафрагмами. Секции инициирования заполняли стехиометрическими водородно- или ацетиленокислородными смесями при давлении $p_{0,н} = 0,3 \div 0,05$ МПа. По длине трубы устанавливали пьезодатчики для измерения скорости фронта волны с помощью 8-канального хронометра, в нижней части тру-

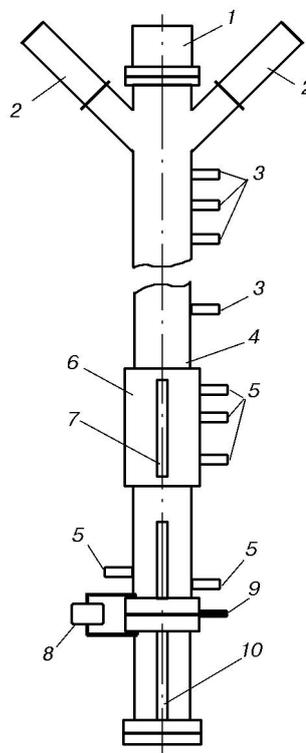


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — электромагнитный конусный клапан, 2 — инициирующие секции, 3 — датчики, 4 — ударная труба, 5 — пьезодатчики, 6 — оптическая секция, 7 — прозрачная щель, 8 — электромагнитный датчик, 9 — оптический ввод ФЭУ, 10 — центральный электрод

бы находилась оптическая секция, пьезодатчики [15, 16] для регистрации давления, оптический ввод ФЭУ для измерения задержки воспламенения и профиля свечения, а также центральный электрод диаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м и длиной 1 м для измерения электропроводности σ продуктов детонации по методике [17] с разрешением $2 \cdot 10^{-4}$ м по пространству и 0,2 мкс по времени. Кварцевые волокна для оптического ввода ФЭУ располагали между двумя изолирующими пленками толщиной 10^{-4} м в том сечении трубы, где измеряли электропроводность. Значение σ определяли по зависимости из [18]:

$$\sigma = k_d (u_d - u_d^0) \ln(d/d_0) / (2\pi D U_0), \quad (2)$$

где $k_d = 1,27 \cdot 10^4$ — коэффициент электромагнитного датчика с учетом широкополосного предусилителя с коэффициентом усиления 110; $U_0 = +10$ В — напряжение на центральном электроде; u_d и u_d^0 — напряжения на электро-

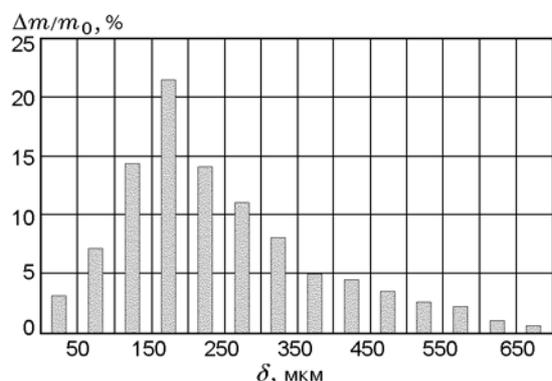


Рис. 2. Относительная массовая концентрация по выделенным с интервалом 50 мкм фракциям октогена

магнитном датчике при $U_0 = +10$ В и $U_0 = 0$ соответственно; D — скорость вакуумной детонации. В опытах использовали 10-витковый электромагнитный датчик с параллельной активной нагрузкой $R = 100$ Ом.

Самосвечение волны фиксировали в оптической секции через прозрачную щель шириной $2 \cdot 10^{-3}$ м и длиной 0,3 м с помощью барабанного фоторегистратора, диск которого вращался перпендикулярно щели. Давление, интенсивность свечения и электропроводность записывали на двухлучевые осциллографы С8-17 и С9-16, информацию с последнего вводили в персональный компьютер.

Трубу откачивали до давления $p_0 \gtrsim 10$ Па. Предварительно взвешенное полидисперсное ВВ (октоген, размер частиц $\delta = 10^{-7} \div 7 \cdot 10^{-4}$ м) из расположенного сверху контейнера высыпалось через электромагнитный конусный клапан в трубу до ее заполнения по всей длине, после чего клапан закрывался и газовую смесь подрывали. Управление всем процессом осуществлялось автоматически с помощью электронного часового устройства. После опыта определяли массу оставшегося в контейнере и несгоревшего в трубе ВВ. Такой способ создания взвеси позволял осуществлять равномерное поступление ВВ и определять среднеобъемную плотность; в опытах значение ρ изменялось от 0,38 до 0,92 кг/м³. Распределение относительных массовых концентраций $\Delta m/m_0$ (Δm — масса выделенной фракции, m_0 — общая масса фракций) по размерам частиц ВВ приведено на рис. 2.

3. Результаты экспериментов. Типичная осциллограмма давления и свечения в волне при холостом (без ВВ) выстреле в вакуумиро-

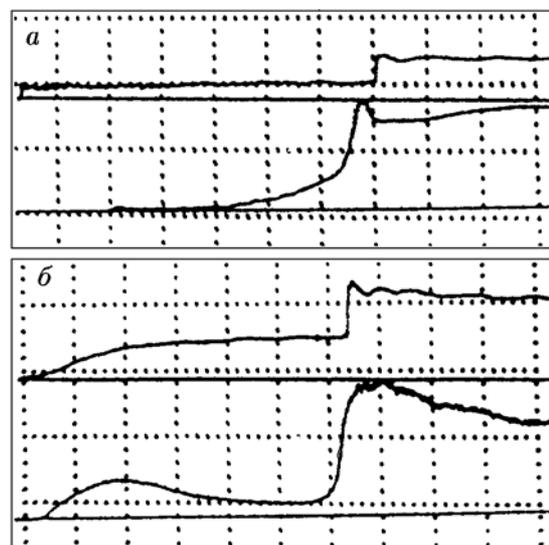


Рис. 3. Профили давления (верхний луч) и свечения (нижний луч) при холостом (без ВВ, $\rho = 0$) выстреле в вакуум (а) и в волне вакуумной детонации при $\rho = 0,92$ кг/м³ (б):

иницирование смесью $C_2H_2 + 2,5O_2$, $p_{0,н} = 0,5 \cdot 10^5$ Па; масштаб по горизонтали $2 \cdot 10^{-4}$ с/дел, по вертикали: а — 0,42 МПа/дел, б — 1,05 МПа/дел

ванный объем трубы ($p_0 \approx 1,4$ кПа) приведена на рис. 3,а, где давление на «полке» составляет 70 кПа, $D \approx 2250$ м/с, а свечение значительно отстает от головной волны ($\Delta t \approx 8 \cdot 10^{-4}$ с). Светящиеся продукты реакции, образующиеся при детонации газовой смеси в секциях инициирования, расширяются после разрыва диафрагм по всей длине трубы. На расстоянии 1 м от верхнего торца трубы скорость движения фронта инициирующей волны $\approx 3 \cdot 10^3$ м/с.

При наличии в трубе взвеси частиц ВВ происходит их воспламенение вблизи переднего фронта и возбуждается вакуумная детонация с плавным профилем давления (рис. 3,б). Фронт свечения следует с задержкой $\approx 3 \div 20$ мкс за плавным передним фронтом давления, давление на плато растет с концентрацией ВВ и составляет $0,3 \div 0,75$ МПа для исследованного диапазона значений ρ . На осциллограмме скачок давления через $\approx 1,3 \cdot 10^{-3}$ с соответствует приходу в данное сечение отраженной от торца трубы волны вакуумной детонации. Если при $\rho \geq 0,5$ кг/м³ детонация легко возбуждается в каждом из опытов, то при $\rho \leq 0,4$ кг/м³ из четырех-пяти опытов лишь в двух-трех самоподдерживающаяся детонация распространялась по всей длине трубы.

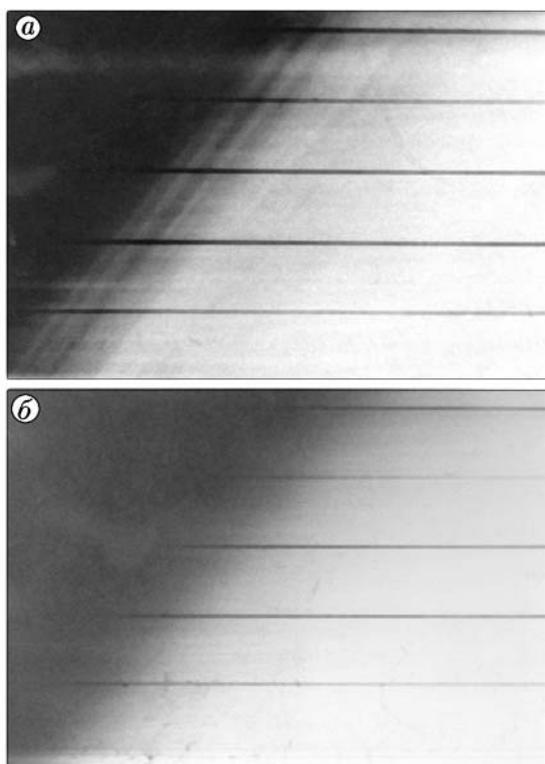


Рис. 4. Фоторазвертки самосвечения волны вакуумной детонации:

расстояние между метками 0,05 м; *a* — $\rho = 0,6 \text{ кг/м}^3$, $D = 1800 \text{ м/с}$, *b* — $\rho = 0,9 \text{ кг/м}^3$, $D = 1720 \text{ м/с}$

Скорость вакуумной детонации определяется скоростью распространения светящихся продуктов реакции, слабо зависит от среднеемобной концентрации ВВ и составляет $\approx (1750 \pm 50) \text{ м/с}$. Слабое влияние концентрации на скорость детонации качественно подтверждает результат, полученный в [6], и объясняется высокой полнотой сгорания ВВ, а также незначительными потерями тепла в стенки трубы, не превышающими 2–3 % общего энерговыделения в системе. Профили давления и свечения практически устанавливаются к концу трубы.

В опытах путем изменения состава и начального давления инициирующей газовой смеси установлено, что характеристики вакуумной детонации не зависят от параметров инициирования. Тем самым экспериментально доказано существование самоподдерживающейся вакуумной детонации, давление и скорость которой зависят лишь от начального состояния системы.

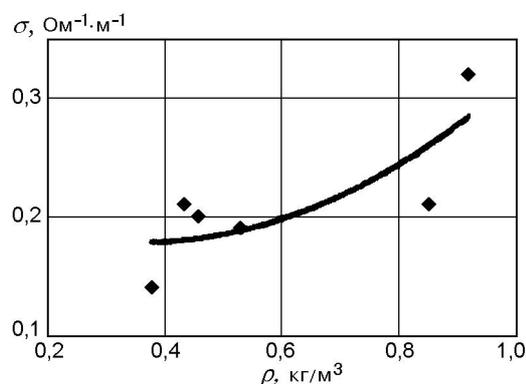


Рис. 5. Зависимость электропроводности продуктов вакуумной детонации от среднеемобной плотности

На фоторазвертках самосвечения детонации (рис. 4) при $\rho \leq 0,7 \text{ кг/м}^3$ (рис. 4, *a*) у переднего фронта наблюдается серия ярких и темных полос, где скорость приблизительно равна D , что указывает на струйный механизм распространения детонации. С увеличением ρ до $0,8 \div 0,9 \text{ кг/м}^3$ свечение в волне становится более интенсивным и плавным, треки на фоторазвертках перестают регистрироваться (рис. 4, *b*). Фронт свечения вакуумной детонации на фоторазвертках размытый, интенсивность свечения постепенно возрастает до максимума в течение $(2 \div 3) \cdot 10^{-4} \text{ с}$, а затем по мере выгорания частиц ВВ спадает в 1,5–2 раза (см. рис. 3, *b*).

Измеренная по осциллограммам скорость передней границы слабо затухающего скачка давления (предвестника) с амплитудой менее 10 кПа внизу трубы превышает скорость детонации на $200 \div 400 \text{ м/с}$ и составляет $2000 \div 2250 \text{ м/с}$. Предвестник формируется с момента инициирования вакуумной детонации (как и при холостом выстреле в трубу), скачок давления на его фронте зависит от остаточного давления, а затухание определяется энергетическими потерями ударной волны.

Наибольшее значение электропроводности в продуктах реакции, определяемое по соотношению (2), зависит от ρ и меняется в диапазоне $0,14 \div 0,32 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ (рис. 5), что на один-два порядка превышает значение σ для смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ [18] и сравнимо с электропроводностью продуктов детонации в газовой смеси частиц алюминия при тех же значениях ρ [19]. Осредненные профили $u_d(t)$, а следовательно, и $\sigma(t)$ (см. формулу (2)) плавные, электропро-

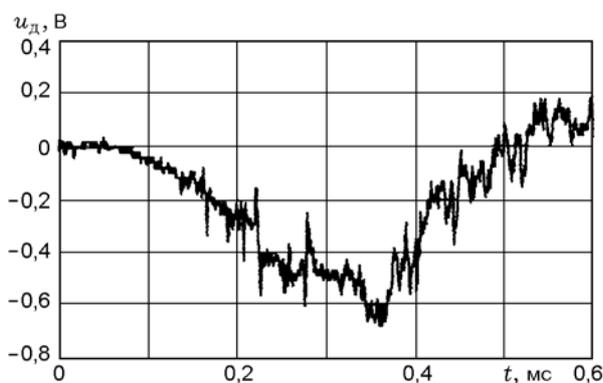


Рис. 6. Характерный профиль электропроводности продуктов вакуумной детонации:

$$\sigma_{\max} = 0,19 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}, \rho = 0,53 \text{ кг/м}^3, D = 1780 \text{ м/с}$$

водность возрастает по мере увеличения интенсивности свечения продуктов, достигая через $0,25 \div 0,3$ мс максимума, и затем плавно спадает (рис. 6).

Для исследованного диапазона значений ρ максимальная степень недогорания ВВ в волне вакуумной детонации менее 5 %. После опыта несгоревшие оплавленные крупные частицы ВВ спекались между собой и скапливались на нижнем торце трубы. В половине опытов ВВ сгорало полностью.

Оценка длины зоны реакции в волне детонации по положению максимума свечения или электропроводности дает близкие между собой значения и составляет $0,4 \div 0,5$ м.

Более низкие экспериментальные значения D по сравнению с расчетной скоростью $D_{СД} \approx 2300$ м/с (1) можно попытаться объяснить частичным недогоранием ВВ и теплопотерями в стенке трубы. Однако сгорание ВВ в опытах было достаточно полное, а оценка потерь по [9] в трубе большого диаметра (0,07 м) дает уменьшение D на несколько процентов. По-видимому, для более полного описания детонации в вакуумированной взвеси ВВ необходимо наряду с газодинамическими моделями процесса привлекать и молекулярно-кинетические.

Итак, в работе впервые экспериментально установлено существование самоподдерживающегося детонационного процесса в вакуум-взвеси вторичного ВВ, оценена длина зоны реакции, приведены данные по электропроводности продуктов детонации и структуре вакуумной детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Низкоскоростная детонация ВВ в вакуумированной пористой среде // Докл. АН. 1992. Т. 325, № 3. С. 498–501.
2. Pinaev A. V. "Vacuum" detonation in a porous medium // Combustion, detonation, shock waves: Proc. Intern. Conf. on Combustion (Zel'dovich memorial). Moscow: The Combustion Inst., Russian Section, 1994. V. 2. P. 378–381.
3. Пинаев А. В. Структура детонационных волн в гетерогенных системах: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1997.
4. Митрофанов В. В., Бакиров И. Т. Детонация взвеси частиц чувствительного ВВ в вакууме // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 122–124.
5. Митрофанов В. В., Субботин В. А. Спиновая детонация напыленного слоя взрывчатого вещества в вакуумированных трубках // Докл. АН. 1998. Т. 363, № 2. С. 191–194.
6. Ждан С. А. Структура детонационных волн в вакууме с частицами унитарного топлива // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 109–115.
7. Ждан С. А. Безударное инициирование детонации в вакууме с частицами унитарного топлива // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 136–142.
8. Ждан С. А. Инициирование расходящейся детонации в вакууме с частицами унитарного топлива // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 66–71.
9. Ждан С. А. Пределы распространения в трубе детонации вакуум-взвесей // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 76–84.
10. Ждан С. А., Прохоров Е. С. Инициирование детонации в вакуум-взвеси частиц гексогена // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 65–71.
11. Нигматулин Р. И., Вайнштейн П. Б., Ахатов И. Ш. Структура стационарных детонационных волн в смесях газа с частицами унитарного топлива // Химическая физика процессов горения и взрыва. Черноголовка, 1980. С. 96–99.
12. Ахатов И. Ш., Вайнштейн П. Б., Нигматулин Р. И. Структура детонационных волн в газозвесах унитарного топлива // Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 5. С. 47–53.
13. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1.
14. Lee F. P., Kauffman C. W., Sichel M., Nicholls J. A. Detonability of RDX dust in air/oxygen mixtures // AIAA Journal. 1986. V. 24, N 11. P. 1811–1816.
15. Пинаев А. В. Измерение давления за фронтом волны детонации в гетерогенной системе газ-пленка // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 105–111.

16. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарировки // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 236–239.
17. Пинаев А. В. Электромагнитный метод измерения массовой скорости и электропроводности, изменяющихся вдоль течения // ПМТФ. 1981. № 2. С. 98–103.
18. Пинаев А. В., Сычев А.И. Измерение профилей электропроводности и процессы ионизации при детонации газов // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 1. С. 112–121.
19. Пинаев А. В. Измерение электропроводности при детонации газов со взвешями алюминия // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 124–127.

Поступила в редакцию 23/ХП 1999 г.
