

сжатой горючей смеси, то ее взрыв не приводит к вторичному инициированию детонационной волны. Интенсивность ударной волны, образовавшейся от взорвавшейся сжатой смеси, оказывается недостаточной для инициирования детонации в несгоревшей смеси. В этом случае перепуска детонационной волны не наблюдается.

Поступила в редакцию 2/XII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Когарко. Изв. АН СССР. ОХН, 1956, 4.
2. К. И. Шелкин. ЖЭТФ, 1959, 36, 2.
3. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. ПМТФ, 1960, 1.
4. Б. П. Волин, Я. К. Трошин и др. ПМТФ, 1960, 2.
5. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчий. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
6. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
7. К. Я. Трошин. Докл. АН СССР, 1978, 240, 3.
8. R. A. Strehlow, R. J. Salm. Acta Astronautica, 1976, 3.
9. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев. ФГВ, 1976, 12, 5.
10. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1977, 13, 3.
11. В. В. Митрофанов, В. А. Субботин.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
12. J. G. Gibson, M. L. Bowser, C. M. Mason. Rev. Sci. Instr., 1959, 30, 10.
13. A. V. Amster, P. A. Kendall et al. Rev. Sci. Instr., 1960, 31, 2.

ПЕРЕДАЧА ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ ОБРАЗЦЫ

И. М. Воскобойников, А. Ю. Долгобородов, М. Ф. Гогоуля
(Москва)

Расчет динамических давлений, передаваемых через пористые образцы, когда известны состояние в среде перед образцами и сжимаемость материалов пористых образцов, является актуальной научной и технической задачей. Ее решение, несмотря на большое число работ, посвященных определению состояния за фронтом ударных волн в пористых образцах, в общем случае вызывает затруднение, поскольку давление в среде за пористым образцом, как правило, экспериментально не определялось. В значительной мере это связано с тем, что направленные исследования передачи динамических давлений через пористые образцы проводились в ограниченном объеме для решения конкретных технических вопросов, а их результаты не получили должных обобщений.

В исследованиях ударного сжатия пористых образцов измеряемым параметром чаще всего была скорость ударной волны $D_{пор}$, характеризующая передаваемое давление только при дополнительных предположениях. Как будет показано ниже, такая информация не всегда достаточна, что делает необходимым измерение еще какого-нибудь параметра для определения давления.

Выделим случаи соотношений сжимаемости среды перед пористым образцом и материала образца: 1 — сжимаемости близки, 2 — сжимаемость среды больше, 3 — сжимаемость среды меньше. Первый случай исследован в работе [1], где обнаружено, что скорости свободной поверхности образцов различной пористости в пределах ошибки измерений совпадают, если средой перед образцом является сплошной материал образца. В работе [2] получено, что давления, передаваемые из сплошного алюминия через алюминий различной пористости в нитрометан и четыреххлористый углерод, одинаковы. Следовательно, передаваемое давление не зависит от пористости образцов (минимальная плотность образца составляла 0,1 плотности материала, а давление в среде перед образцом 20—50 ГПа).

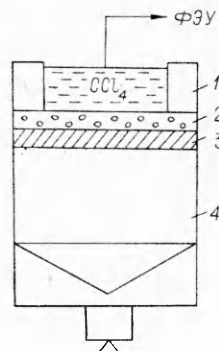


Рис. 1.

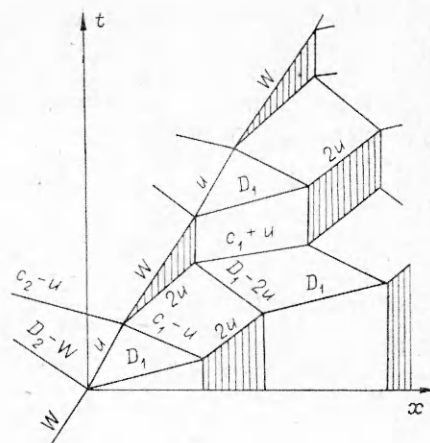


Рис. 2.

Для второго случая соотношений сжимаемостей в [2] установлено, что при увеличении пористости образца $\epsilon = 1 - \rho_{00}/\rho_0$ (ρ_{00} — плотность образца, ρ_0 — плотность материала образца) от нулевой до некоторой $\epsilon_{кр}$ передаваемое давление сохраняется неизменным, а затем в небольшом диапазоне изменения ϵ возрастает.

В данной работе проводились исследования для третьего случая соотношений сжимаемостей. При этом помимо измерения передаваемых давлений определялось время прохождения ударными волнами фиксированных толщин пористых образцов. Использовалась следующая постановка опытов (рис. 1). На торце заряда гексогена 4 диаметром 40 и высотой 60 мм (иницирование проводилось генератором плоского фронта) размещался медный экран 3, на который помещались магниевые образцы 2 из прессованного порошка МФ-3. На магниевых образцах находились кюветы 1 с четыреххлористым углеродом, температура ударного сжатия которого измерялась электронно-оптическим методом [3].

Увеличение на 1 ГПа передаваемого в жидкость давления приводило к росту яркости свечения, пропорциональной току ФЭУ, в 1,5 раза. Разброс значений яркости в идентичных опытах составлял 0,15 от определяемой величины, что позволяло фиксировать изменение передаваемого давления с точностью 0,5 ГПа.

Для сравнения в тех же условиях проводились опыты с передачей давления от магниевого экрана через пористые образцы магния (перед магниевым экраном находился заряд тротила). При нулевой пористости образцов плотности зарядов гексогена и тротила подбирались так, чтобы в четыреххлористый углерод выходили волны равной интенсивности (заряды гексогена имели плотность $1,71 \text{ г/см}^3$, тротила — $1,50 \text{ г/см}^3$). Если плотности зарядов не меняются, то передаваемое в жидкость давление остается постоянным при всех исследованных плотностях образцов магния от 1 до $1,725 \text{ г/см}^3$. Температура ударного сжатия CCl_4 в указанных условиях равна 2050 К, чему соответствует давление в CCl_4 14,0 ГПа, а в сплошном магнии — 18,5 ГПа. При определении давлений использовались ударные адиабаты CCl_4 в виде $D = 1,17 + 1,72u - 0,06u^2$ [4] при $\rho_0 = 1,594 \text{ г/см}^3$ и магния в виде $D = 4,493 + 1,266u$ [5] при $\rho_0 = 1,725 \text{ г/см}^3$ (здесь u — массовая скорость). Зависимость температура — давление ударного сжатия CCl_4 взята из [3].

Применялся также другой способ нагружения: пористый образец помещался на магниевый или медный экран, по которому ударяла медная пластина толщиной 2 и диаметром 38 мм, разогнанная на базе 19 мм продуктами взрыва заряда гексогена плотностью $1,71 \text{ г/см}^3$. Здесь передаваемое давление также не зависело от пористости образцов. Для второго способа нагружения температура ударного сжатия CCl_4 равна 2450 К, давление в CCl_4 — 17,0 ГПа и в сплошном магнии — 22,0 ГПа.

ВВ	Материал		Плотность, г/см ³		Δt, мкс	
	экрана	образца	заряда	образца	эксперимент	расчет
Тротил	Магний	Магний	1,50	1,1	0,13±0,03	0,16
Гексоген	Медь	»	1,71	1,1	0,22±0,03	0,26
»	»	Алюминий	1,71	1,8	0,28±0,03	0,27
ТГ 50/50	Алюминий	»	1,55	1,8	0,21±0,03	0,20

Подобные опыты проведены также с пористыми образцами алюминия, которые помещались на медные и алюминиевые экраны. Перед экранами находились соответственно заряды гексогена с плотностью 1,71 г/см³ и ТГ 50/50 с плотностью 1,55 г/см³. Результат этой серии опытов тот же: при изменении плотности алюминиевых образцов от 2,71 до 1,80 г/см³ величина передаваемого давления в пределах погрешности измерений сохраняется постоянной.

Время прохождения ударной волной пористых образцов измерялось с применением электроконтактных датчиков и частотомера ЧЗ-34 А. Временное разрешение схемы составляло 0,01 мкс, а разброс в идентичных опытах — не более 0,03 мкс. В работе не исследовался процесс затухания волн в образцах, а только определялись времена прохождения ударной волной образцов разной пористости толщиной 3 мм при толщине экранов перед ними 3 мм. Увеличение времени прохождения ударной волной пористого образца относительно времени прохождения сплошного образца (Δt_0) приведено в таблице.

При равном передаваемом давлении времена прохождения волной образцов одинаковой пористости в случае медных экранов больше соответствующих времен при совпадении материалов экрана и образца. При пористостях около 0,33 для алюминия и 0,36 для магния это различие заметно превышает ошибку измерения. Значения Δt_0 в случае экранов из материала образца находятся в согласии с расчетом по формуле, предложенной в [1].

Имеется несколько подходов к объяснению особенностей распространения ударных волн и передачи динамических давлений через пористые образцы. Наиболее часто пористый образец рассматривается как однородная среда с плотностью ρ_{00} , и предполагается, что имеющиеся в образце несплошности не вносят качественно новых моментов в процесс распространения ударных волн. В рамках такого подхода на диаграмме $p-u$ состояние в пористом образце есть точка пересечения луча $\rho_{00}D_{пор}$ и энтропы или ударной адиабаты сжатого состояния материала ударника. Наклон луча тем меньше, чем больше пористость образца. Поскольку энтропы и ударные адиабаты сжатых пористых образцов в пределах ошибки измерения совпадают на $p-u$ -диаграмме с соответствующими зависимостями для сплошных материалов (см., например, [2] и экспериментальные данные для пористой меди из [6]), при передаче динамических давлений через пористые образцы алюминия и магния, которые помещены на медные экраны, следовало ожидать уменьшения давления в СС1₄. Аналогично, когда перед пористыми образцами были продукты взрыва, следовало ожидать увеличения передаваемого давления. В опытах для обоих случаев наблюдалось постоянство передаваемого давления при изменении пористости образцов от 0 до 0,3.

Рассматривая пористый образец как сплошную среду, нельзя объяснить различие времен прохождения ударных волн через пористые образцы при различных соотношениях сжимаемостей материалов экранов и образцов, когда пористости образцов и передаваемые давления равны.

В работе [1] предложен качественно другой подход, основанный на равенстве скоростей волны и свободных поверхностей в образцах различ-

ной структуры (прессованный из порошка или набор фольг). Равенство скоростей наблюдалось в [1] для случая, когда материалы образца и экрана совпадали. Этот подход оказался эффективным для объяснения особенностей передачи динамических давлений, когда материалы образцов динамически более жесткие, чем материалы экранов [2]. Рассмотрим ожидаемые эффекты для набора фольг при сжимаемости экрана, меньшей материала фольг.

Пусть по системе фольг из алюминия или магния, разделенных зазорами, ударяет толстая медная пластина (медь из названных материалов наименее сжимаема), подлетающая со скоростью W . По первой фольге и ударяющей пластине будут распространяться ударные волны со скоростями D_1 и $D_2 - W$, а контактная граница приобретает массовую скорость u (см. схему на рис. 2). Когда ударная волна в фольге выйдет на свободную поверхность, то последняя приобретает скорость $2u$ (здесь и дальше будем для простоты предполагать зеркальность в координатах $p - u$ ударной адиабаты исходного и изэнтропы сжатого состояний для рассматриваемых материалов). В обратном направлении отразится волна разрежения со скоростью $c_1 - u$. Скорость звука в сжатом материале фольг при сделанных предположениях $c_1 = (c_0 + 2bu)(c_0 + bu - u)/(c_0 + bu)$ при ударной адиабате материала $D = c_0 + bu$ и для не слишком сильных волн близка к D_1 . При выходе волны разрежения на контактную поверхность произойдет разрыв (на схеме разрыва сплошности заштрихованы): вещество фольги приобретает скорость $2u$, а вещество пластины — W , которая меньше $2u$. Если пластина и фольга из материалов равных сжимаемостей, то разрыва не будет. По пластине пойдет волна разрежения со скоростью $c_2 - u$, которая через некоторое время догонит ушедший ранее со скоростью $D_2 - W$ ударный фронт. Иными словами, ударные волны в пластине от ударов по фольге распространяются на ограниченную глубину.

Первая фольга после пролета зазора до второй фольги ударяется об нее, и по обеим фольгам пойдут ударные волны со скоростями D_1 и $D_1 - 2u$. Когда в первой фольге ударная волна выйдет на тыльную свободную поверхность, то вещество фольги останавливается в волне разрежения, распространяющейся со скоростью $c_1 + u$, большей D_1 . По остановившейся фольге через некоторое время вновь ударит пластина, и в ней возникает то же состояние, что и при первом ударе.

Для процесса в целом существен догон фронта волнами разрежения, которые образуются из-за разных сжимаемостей материалов пластины и фольг при разрывах сплошности на контактной границе. Это ведет к тому, что скорость фронта будет меньше, чем в случае одинаковых материалов, хотя передаваемое давление определяется состоянием, возникающим на контактной границе пластина — фольга, и остается неизменным для образцов разной пористости. Возникновение разрывов приводит к остаточной пористости, которая тем выше, чем больше различие сжимаемостей материалов пластины и фольги.

В рамках этой схемы выполнены расчеты для алюминиевых и магниевых образцов плотностью 1,8 и 1,1 г/см³. Полученные данные представлены в таблице. Для алюминиевых образцов при замене алюминиевого экрана на медный происходит уменьшение скорости ударной волны на 0,45 мм/мкс, чему на базе 3 мм соответствует расчетное значение $\Delta\tau_p = 0,269$ мкс. Эта величина близка к экспериментальному значению $0,28 \pm 0,03$ мкс. Для магниевых образцов уменьшение скорости составляет 0,7 мм/мкс ($\Delta\tau_p = 0,273$ мкс), что несколько больше экспериментальной величины $0,22 \pm 0,03$ мкс.

Таким образом, рассмотрение передачи динамических давлений через набор фольг позволяет правильно предсказать основные особенности процесса передачи давления через прессованные пористые образцы.

Поступила в редакцию 23/XI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Thouvenin. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965.
2. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя и др. Докл. АН СССР, 1977, 236, 4, 75.
3. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 4, 807.
4. R. D. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12, 6024.
5. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
6. Л. В. Альтшулер, А. В. Бушман и др. ЖЭТФ, 1980, 78, 2, 741.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ.

I. ВЗРЫВНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ДИЦИАНА

*Л. И. Бубнова, Е. Б. Гордон, М. С. Дроздов, С. И. Светличный,
В. Л. Тальрозе, С. Г. Хидиров, Ю. Б. Шекк
(Черноголовка)*

Пламена дициана C_2N_2 и дицианацетилен C_4N_2 — самые высокотемпературные из всех известных пламен. Благодаря исключительно высокой термической устойчивости основных продуктов сгорания (молекулы CO и N_2) и достаточно высоким тепловым эффектам реакций в этих пламенах развиваются температуры 4850—5200 К [1—4]. Еще более высокие температуры (приблизительно в c_p/c_v раз) можно получить при проведении этих реакций в замкнутом объеме. По расчетам [2] во взрывах при $V = \text{const}$ развиваются температуры 5500—6000 К, что близко к теоретическому пределу температур, достижимых химическим путем [2].

Пламена дициана отличаются также чрезвычайно высокой яркостью свечения: внутренний конус пламени сравнивают по яркости с угольной дугой [3]. Спектральный состав излучения пламен C_2N_2/O_2 изучен, по крайней мере, в качественном отношении [3, 5, 6], а спектральные и световые характеристики излучения при взрывном окислении дициана в замкнутом объеме, насколько известно авторам, в литературе не описаны. Интерес к изучению излучательных свойств столь высокотемпературных взрывов стимулируется еще и следующими обстоятельствами. Во-первых, имеется расхождение между измеренными [7] значениями яркостной температуры (7000—8000 К) излучения при взрывах смесей дициана с кислородом с расчетными [2] значениями (5500—6000 К) адиабатической температуры, что наталкивает на мысль о возможности существования сверхравновесной интенсивности излучения, как это сообщалось [8] для других взрывных смесей. Во-вторых, столь яркие вспышки излучения могут представлять интерес в качестве просвечивающих источников для абсорбционной спектроскопии других пламен и взрывов [1] или как эталонные источники сравнения для фотометрии. Кроме того, в [7, 9] сообщалось о попытках использования реакции взрывного окисления дициана для создания высокоинтенсивных импульсных источников света.

В настоящей работе измерены спектральные и световые характеристики взрывного источника излучения на основе смесей $C_2N_2 + O_2$ при начальных давлениях $p_0 = 0,2 \div 2,5$ атм и $V = \text{const}$. Полученные результаты позволили сделать вывод о природе наблюдаемого излучения.

Установка и методика измерений. Установка состояла из системы приготовления и напуска смеси, оптической кюветы (камеры сгорания), устройств поджигания и синхронизации, а также системы регистрации светового сигнала. Рабочая смесь готовилась последовательным напуском компонентов в бачок с принудительным перемешиванием при давлении ниже атмосферного. В камеру сгорания смесь подавалась через мембранный компрессор. Состав смесей характеризовался параметром

$$R = 100 \frac{p_{C_2N_2}}{p_{C_2N_2} + p_{O_2}}$$