

*И.А. Балаганский, В.А. Агурейкин, С.В. Разоренов,
А.В. Уткин*

ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНОЙ СТЕНКИ ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНОЙ КЕРАМИКИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЗАРЯДАХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

Экспериментально и численно исследовано влияние инертной стенки из высокомодульной керамики на распространение детонации в зарядах конденсированных гетерогенных ВВ. Показано, что в исследованной области на границе раздела ВВ — керамика реализуется режим типа недосжатой детонации. При этом увеличивается скорость детонации, уменьшаются массовая скорость и давление на фронте детонационной волны, что объясняется непосредственным влиянием опережающей волны на непрореагировавшее ВВ и зону химической реакции. Перпендикулярно фронту детонационной волны распространяются поперечные волны со скоростью ~ 6 км/с, которые влияют на детонационные параметры. Степень влияния поперечных волн определяется начальной скоростью разложения ВВ непосредственно после ударного сжатия.

Представленные в работах [1—4] результаты экспериментальных исследований детонационных режимов в зарядах конденсированных ВВ, контактирующих с высокомодульными керамическими материалами, позволили установить существование нестационарных детонационных режимов, параметры которых определяются геометрией экспериментальной сборки, а также свойствами материала оболочки и кинетикой взрывчатого разложения ВВ. Отмечалось как повышение, так и снижение скорости детонации, а также детонационного давления по сравнению с параметрами Чепмена — Жуге. Существование таких режимов определяется наличием в оболочке изозентропической упругой волны с амплитудой порядка 10 ГПа, распространяющейся со скоростью, превышающей скорость стационарной детонации, что позволяет ей оказывать влияние на еще не прореагировавшую часть заряда ВВ и непосредственно на зону химической реакции, в которой происходит его разложение.

В данной работе основное внимание уделялось изучению процесса распространения детонационной волны (ДВ) вдоль границы раздела ВВ — высокомодульная керамика.

Эксперимент

Для эксперимента использовались образцы из самосвязанного карбида кремния с плотностью $3,1 \text{ г/см}^3$, изготовленные в ИПМ АН Украины, в виде пластин с размерами $63 \times 60 \times 10 \text{ мм}$. Измеренная скорость звука в материале пластин составляла $11,1 + 11,2 \text{ км/с}$, амплитуда упругой волны (HEL) могла достигать 8 ГПа. В отличие от серийно изготавливаемого материала образцы имели меньшее количество посторонних примесей и минимально достижимую пористость. Экспериментальные сборки для измерения детонационных параметров представляли собой сэндвич, состоящий из шашки ВВ, находящейся в контакте со шлифованной стороной карбидокремниевой пластины (рис. 1). Для исключения возможности появления зазоров монтаж экспериментальныхборок производился на вакуумной смазке. Скользящая детонационная волна (ДВ) возбуждалась плосковолновым генератором через парафиновую линзу.

Измерялись параметры скользящей волны на границе раздела ВВ — керамика методом манганиновых датчиков [5]. Использовались датчики в виде полос шириной 0,5 и длиной 30—40 мм (рис. 2), которые вырезались

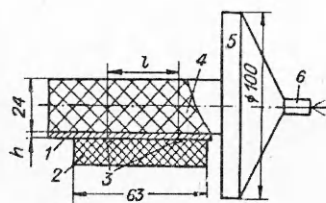


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки.
1 — металлическая пластина; 2 — керамическая пластина; 3 — манганиновые датчики; 4 — ВВ; 5 — плосковолновой генератор; 6 — капсюль-детонатор.

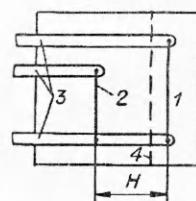


Рис. 2. Манганиновые датчики 1 и 2.
3 — выводы; 4 — фронт ДВ.

из фольги толщиной $\Delta = 20$ мкм. Их применение позволило устранить завал фронта, обусловленный постепенным нагружением чувствительного элемента. Остается лишь завал, связанный с кривизной фронта ДВ и возможной непараллельностью датчиков и фронта. В двух экспериментах между датчиками и ВВ устанавливались пластины из алюминия и меди. При наличии металлической пластины толщина фторопластовой изоляции с двух сторон датчиков составляла по 80 мкм, при отсутствии пластины со стороны ВВ — 200 мкм. Точность измерений по времени не хуже 0,01 мкс, точность измерений давления $3 \pm 5\%$. Начальное давление инициирования во флегматизированном гексогене от плосковолнового генератора составляло около 5 ГПа, длительность импульса не менее 5 мкс.

Исходные данные и результаты измерений сведены в табл. 1. Профили давлений, записанные манганиновыми датчиками для литого тротила и флегматизированного гексогена представлены на рис. 3. База измерений для литого тротила $l = 14$ мм; для флегматизированного гексогена $l = 29,35$ мм. Металлическая пластина в обоих случаях отсутствовала. В табл. 1 представлены максимальные давления p_1 и p_2 , измеренные датчиками 1 и 2 по ходу ДВ, и скорость детонации D , рассчитанная по времени прохождения максимумов давления в датчиках.

Анализ результатов измерений показывает, что в исследованной области детонационный процесс на границе ВВ — керамика имеет нестационарный характер. При этом давление на фронте ниже давления стационарной детонации, а скорость детонации флегматизированного гексогена превышает скорость стационарной детонации примерно на 12%, что значительно превосходит погрешность измерений. Отметим также разницу в поведении прессованного и литого ТНТ, что, вероятно, связано с отличиями в кинетике взрывчатого разложения. (Известно, что скорость разложения

Т а б л и ц а 1

Исходные данные и результаты экспериментов

ВВ	ρ_0 , г/см ³	Параметры Чепмена — Жуге		Материал пластины и h , мм	p_1 , ГПа	p_2 , ГПа	D , км/с
		D_H , км/с	p_H , ГПа				
ТНТ (прессованный)	1,60	6,94	19,0	Сп; 1,60	14,2	16,4	7,02
				—	12,2	14,6	7,11
ТНТ (литой)	1,60	6,90	19,0	—	18,0	16,5	6,86
ТГ = 36/64 (литой)	1,67	7,80	25,4	—	17,1	17,0	7,37
Гексоген (флегматизированный)	1,60	8,00	25,6	Ал; 1,34	20,0	19,5	8,44
				—	17,0	17,8	8,95

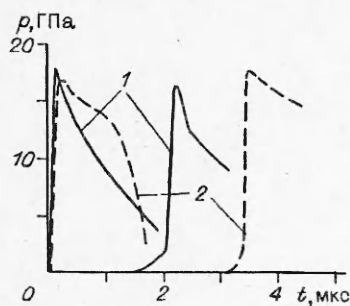


Рис. 3. Профили давлений, записанные манганиновыми датчиками для литого ТНТ (1) и для флегматизированного гексогена (2).

прессованного ТНТ примерно в 5 раз выше, чем литого [6].) Зафиксированное в опытах повышение скорости детонации, по-видимому, не связано с инициированием ВВ опережающей волной в керамике, поскольку в ряде специально выполненных экспериментов наблюдалась чрезвычайно низкая инициирующая способность упругой волны в керамике. Наиболее вероятная причина описанных явлений — непосредственное влияние волны в керамике на зону химической реакции, в которой происходит разложение ВВ.

Численное моделирование

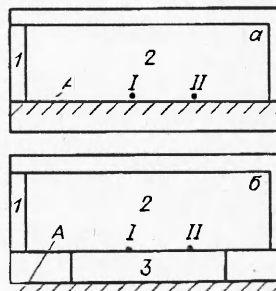
С целью объяснения наблюдаемых в экспериментах особенностей детонационных процессов с помощью программного комплекса ПОТОК [7] на ЭВМ ЕС-1061 выполнено численное моделирование в двумерной плоской постановке без учета возможного разрушения материалов. Учитывалось упругопластическое поведение материала керамической пластины. Тензор напряжений в этом случае представляется в виде суммы шаровой и девиаторной частей. Расчет шаровой части ведется по уравнению ударной адиабаты, девиатор вычисляется в соответствии с законом Гука и ассоциированным с критерием текучести Мизеса законом пластического течения, согласно процедуре Уилкинса. Плотность материала $\rho_m = 3,1 \text{ г/см}^3$; модуль сдвига $G = 170 \text{ ГПа}$; упругий предел Гюгонио $HEL = 8 \text{ ГПа}$. Уравнение ударной адиабаты принималось в виде $D = 8,0 + 0,95u$, где D — скорость ударной волны, u — массовая скорость за фронтом. При расчете детонации учитывалась кинетика взрывчатого разложения ВВ. Сущность учета кинетики заключается в наличии кинетического соотношения для скорости разложения конденсированной смеси продуктов детонации (ПД) — ВВ. Расчет параметров смеси ведется в предположении аддитивности массы и внутренней энергии в рамках односкоростной адиабатической модели. Кинетическое соотношение имеет вид

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = K(\alpha + \alpha_0)(p - p^*),$$

где α — степень разложения ВВ; K и α_0 — параметры кинетического соотно-

Рис. 4. Исходная конфигурация задач К1 и К3 (а), К2 и К4 (б).

1 — алюминиевый ударник (начальная скорость 2 км/с); 2 — ВВ; 3 — керамическая пластина. А — абсолютно жесткая стенка; I и II — лагранжевы объемы.



Т а б л и ц а 2

Значения параметров для расчета детонации

Задача	Наличие пластины	α_0	p^* , ГПа
K1	Нет	0,07	1,3
K2	Есть	0,07	1,3
K3	Нет	0,10	0,4
K4	Есть	0,10	0,4

П р и м е ч а н и е. Показатель политропы $n = 3,13$; начальная плотность $\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$; скорость звука в ВВ $c_{ВВ} = 2,5 \text{ км/с}$; $K = 1,01 \text{ 1/(мкс} \cdot \text{ГПа)}$.

шения; p — давление; p^* — давление, при котором включается механизм разложения ВВ. Данное предположение справедливо не во всей области изменения α , так же как и достаточно широко распространенные предположения об адиабатичности либо равновесии в области реакции. Из физических соображений следует, что принятое предположение хорошо выполняется в области $\alpha \approx 0,5$. Продукты детонации описываются моделью идеального газа с постоянным показателем политропы.

В описанной ниже серии расчетов качественно исследовалось влияние параметров кинетического соотношения на распространение детонации вдоль границы ВВ — SiC. Варьировались значения α_0 и p^* . Во всех случаях пространственное разрешение по координатам x и y составляло 1 ячейку на 1 мм.

Рассмотрим результаты моделирования четырех вариантов K1 — K4, отличающихся попарно между собой наличием или отсутствием карбидокремниевой пластины (в задачах K1 и K3 — пластина отсутствует), и параметрами α_0 и p^* в кинетическом соотношении.

Исходные конфигурации приведены на рис. 4. Толщина керамической пластины 10 мм. Границы расчетной области: левая и правая — открытые; верхняя граница отсутствует; нижняя — закрытая. Открытые границы ограничивают движение адаптирующейся эйлеровой сетки и одновременно позволяют частицам тел втекать вовнутрь и покидать расчетное поле и не представляют собой препятствия для распространения ударных волн и других возмущений. Отсутствие верхней границы означает возможность движения эйлеровой сетки вместе с деформирующимся телом. При этом на свободной границе тела ставится граничное условие, эквивалентное границе с вакуумом. Закрытая граница эквивалентна абсолютно жесткой стенке. На контактных поверхностях, участвующих в расчетах тел, ставились граничные условия, обеспечивающие возможность проскальзывания частиц тел друг относительно друга. В табл. 2 приведены значения параметров для расчета детонации.

Результаты моделирования представлены на рис. 5, 6. Результаты сведены в табл. 3, где представлены основные параметры на фронте детонационной волны для всех четырех вариантов.

Анализ показывает, что наличие пластины из высокомодульной керамики приводит к нестационарности детонационного процесса на границе раздела. В расчетной области увеличивается скорость детонации, уменьшаются массовая скорость и давление на фронте ДВ, что является признаком недосжатой детонации. Причем эффект ярче выражен в случае более чувствительного ВВ, что согласуется с результатами экспериментов.

Возмущения параметров детонационного процесса на границе раздела догоняют фронт и приводят к изменению формы детонационного фронта, что можно видеть на рис. 5. Основной результат численного моделирования заключается в том, что наблюдаемые в экспериментах проявления нестационарности детонационного процесса воспроизводятся в счете без привлечения каких-либо необычных гипотез, связанных, например с фазовыми переходами в материале пластины, явлений пьезоэффекта и т.п. Следовательно, вся физика явления лежит внутри основных допу-

Т а б л и ц а 3

Параметры течения на фронте детонационной волны

Задача	D , км/с	u , км/с	p , ГПа
K1	7,3	2,13	26,6
K2	7,4	1,86	24,0
K3	9,0	1,70	25,0
K4	10,0	1,13	23,0

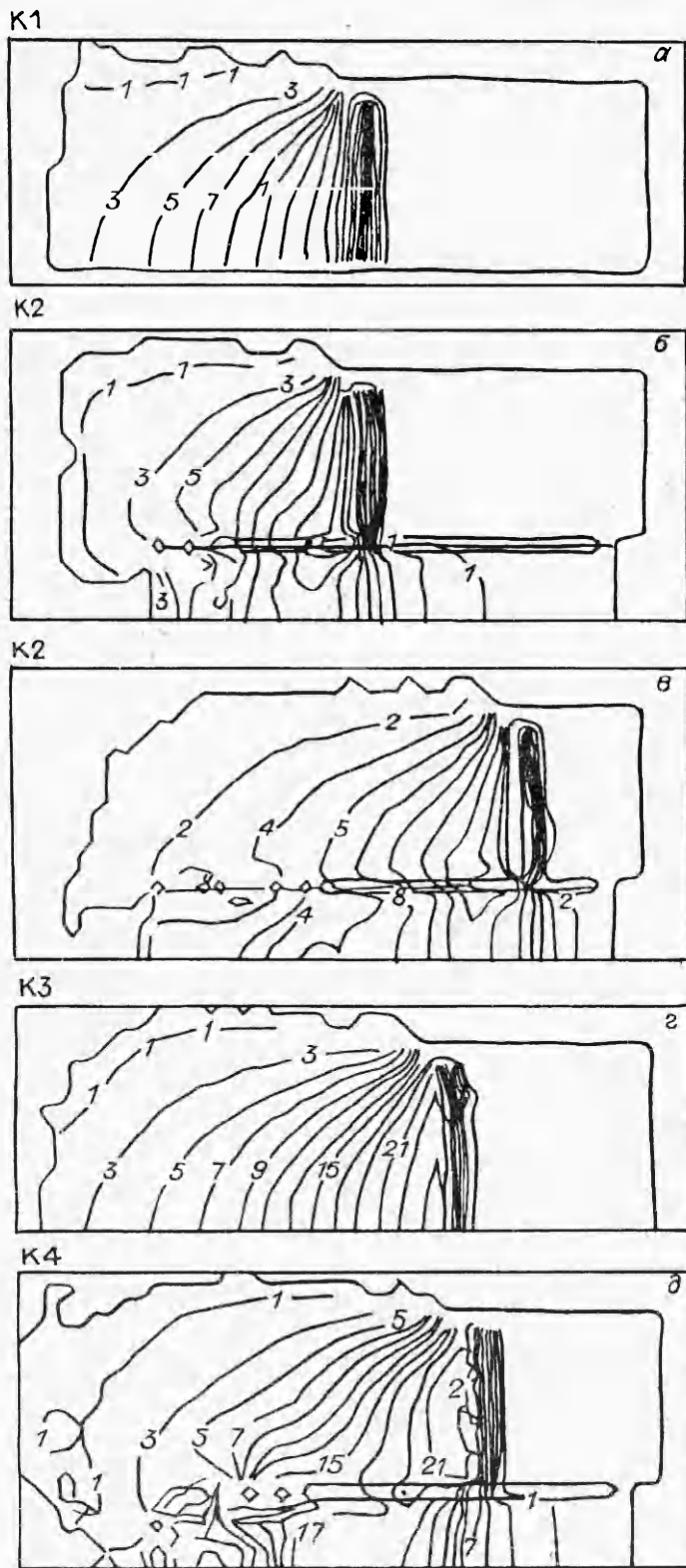


Рис. 5. Поля течений материалов и изолинии давлений в гигапаскалях для задач К1 — К4.
 1, мкс: а, б, в, д — 6, е — 9.

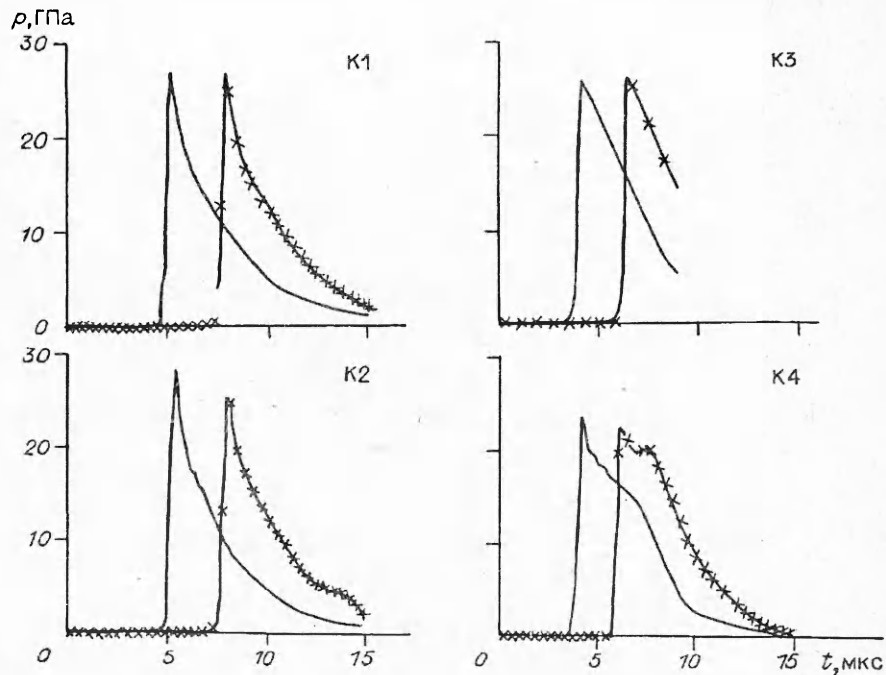


Рис. 6. Профили давления в лагранжевых объемах I и II в зависимости от времени.

щений, принятых при численном моделировании, и сводится к влиянию волн сжатия и разрежения, распространяющихся в керамике со скоростью, превышающей скорость детонации, на непрореагировавшее ВВ и зону химической реакции.

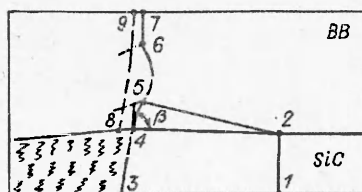
Физическая интерпретация

Поскольку речь идет о нестационарных двумерных газодинамических течениях, анализ имеет качественный характер и основывается на экспериментальных и численных результатах. Из них непосредственно следует, что особенности в поведении ВВ определяются воздействием опережающей волны на еще не прореагировавшее ВВ и зону химической реакции.

Наиболее близок по физической сути к описываемому газодинамическому течению каналный эффект [8], который влияет на режимы детонации различных ВВ. В результате действия каналного эффекта может наблюдаться временное или постоянное повышение скорости детонации, пульсирующие детонационные режимы, а иногда — полное затухание детонации. В отличие от каналного эффекта в нашем случае опережающая волна, распространяющаяся по керамической стенке, не имеет ударного фронта и движется с постоянной скоростью, равной стержневой скорости звука c_s в материале стенки.

На рис. 7 представлена волновая картина распространения детонационного процесса в заряде ВВ, контактирующем с керамической пластиной. По заряду ВВ распространяется детонационная волна 4—7, генерирующая в керамической пластине опережающую волну, фронт которой 1—2 имеет постоянную скорость $c_s = 11$ км/с. Эта волна создает в заряде ВВ косую волну сжатия без ударного фронта 2—5, распространяющуюся по ВВ со скоростью $c_{ВВ} = 2,5$ км/с. Такая волна обладает сильным пассивирующим действием, и используемые в экспериментах ВВ при этом не детонируют. За фронтом упругой волны по керамике движется волна разрушения 3—4, за которой керамика теряет сдвиговую прочность.

Рис. 7. Волновая картина распространения детонационного процесса вдоль границы ВВ — керамика.



Область фронта детонационной волны 4—5 распространяется по слою ВВ, сжатому опережающей волной, поэтому, как и любая ударная волна, она начинает ускоряться, поскольку движется по веществу повышенной плотности. По мере ускорения эта область отрывается от зоны химической реакции и ее параметры на фронте начинают падать, а соответственно падает и скорость. Затем процесс повторяется. При этом скорость детонации на границе ВВ — керамика имеет пульсирующий характер и угол β зависит от времени. Размер области фронта детонационной волны, распространяющейся по ВВ, сжатому опережающей волной, растет со временем и равен

$$l_{(4-5)} = \frac{c_{\text{ВВ}}(c_s - D)}{c_s} t,$$

где D — средняя скорость детонации; t — время, прошедшее с момента инициирования. К моменту $t = 9$ мкс $l_{(4-5)} = 6$ мм. В то же время к моменту $t = 9$ мкс в расчете наблюдается возмущенная область на детонационном фронте 5—6, значительно превышающая область 4—5, охваченную косой волной сжатия впереди детонационного фронта. Повышенная скорость распространения возмущений на детонационном фронте может быть объяснена тем, что возмущение, зародившееся на границе, распространяется по сжатой смеси ПД — ВВ со значительно более высокой скоростью, чем волна 4—5. Скорость поперечной волны приближенно можно оценить, приняв ее равной скорости звука в точке Чепмена—Жуге. Тогда

$$c_{(5-6)} \approx \frac{nD}{n+1},$$

где n — показатель изоэнтропы ПД. Для $D = 8$ км/с и $n = 3,13$ получим $c_{(5-6)} = 6,1$ км/с.

Таким образом, возмущенная область на детонационном фронте растет значительно быстрее, чем в исходном ВВ, и пульсирующий детонационный процесс быстро охватывает весь детонационный фронт. Очевидно, что дальнейшая реакция ВВ на вносимые возмущения определяется параметрами в кинетическом соотношении. В работе [9] показано, что важной характеристикой ВВ, определяющей его реакцию на нагружение ударной волной, является начальная скорость разложения непосредственно после ударного сжатия. Эта характеристика тесно связана с величиной критического диаметра ВВ.

Предположим, что при прочих равных условиях поведение ВВ определяется величиной начальной скорости разложения за ударным фронтом стационарной детонационной волны. Тогда в зависимости от начальной

Т а б л и ц а 4

Начальные скорости разложения некоторых ВВ на фронте стационарной детонационной волны

ВВ	ρ_0 , г/см ³	K , 1/(мкс·ГПа)	α_0	P_x , ГПа	P^* , ГПа	$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_\Phi$, 1/мкс
ТНТ (литой)	1,62	1,10	0,02	24,2	5,2	0,42
ТНТ (прессованный)	1,59	1,30	0,05	23,7	2,3	1,39
ТГ = 36/64	1,71	1,70	0,05	37,5	1,8	3,03
Гексоген (флегматизированный)	1,72	2,50	0,07	45,0	1,5	7,61
Октоген (флегматизированный)	1,82	2,00	0,10	46,8	0,5	9,26

скорости разложения будет определяться степень влияния керамической стенки на детонационные параметры. Вычислим для некоторых ВВ начальные скорости разложения на фронте стационарной детонационной волны по формуле

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\phi} = K\alpha_0(p_x - p^*),$$

где p_x — давление в химпике. Результаты расчетов даны в табл. 4. Можно отметить, что имеется корреляция между начальной скоростью разложения ВВ и экспериментальными данными, в которых отмечается тенденция повышения скорости детонации с ростом начальной скорости разложения ВВ.

Выводы

Таким образом, влияние инертной стенки из высокомодульной керамики, имеющей скорость распространения возмущений, превышающую скорость стационарной детонации в заряде конденсированного ВВ, сводится к следующему: на границе раздела ВВ — керамика реализуется нестационарный детонационный режим. При этом наблюдается местное увеличение скорости детонации, уменьшение массовой скорости и давления на фронте детонационной волны, что является признаком недосжатой детонации. Физика процесса сводится к влиянию волн сжатия и разрежения, распространяющихся в керамике со скоростью, превышающей скорость детонации, на непрореагировавшее ВВ и зону химической реакции.

На границе раздела реализуется пульсирующий детонационный режим, который служит источником поперечных волн, распространяющихся перпендикулярно фронту ДВ со скоростью ~ 6 км/с и оказывающих влияние на параметры детонации.

Реакция ВВ на действие поперечных волн определяется величиной начальной скорости разложения ВВ непосредственно за фронтом ДВ, которая тесно связана с величиной критического диаметра ВВ. Чем выше начальная скорость разложения ВВ, тем больше степень влияния инертной стенки на детонационный процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aveille J., Carion N., Vacellier J. et. al. Experimental and Numerical Study of Oblique Interactions of Detonation Waves with Explosive / Solid Material Interfaces // The 9th Symp. (Int.) on Detonation. — 1989. — V. 3. — P. 855—863.
2. Балаганский И.А., Кобылкин И.Ф., Разоренов С.В. и др. Влияние оболочки из карбида кремния на детонационные параметры в зарядах ВВ // 5 Всесоюз. совещание по детонации. — Красноярск, 1991. — Т. 2. — С. 345—350.
3. Агурейкин В.А., Балаганский И.А., Разоренов С.В. и др. Распространение детонационной волны вдоль границы раздела ВВ — карбид кремния // 10 Симпозиум по горению и взрыву. Детонация: Тезисы докладов. — Черногоровка, 1992. — С. 49—50.
4. Balagansky I.A., Razorenov S.V., Utkin A.V. Detonation Parameters of Condensed High Explosive Charges with Long Ceramic Elements // The 10th International Detonation Symposium: Paper Summaries. — Boston, 1993. — P. 145.
5. Капель Г.И. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, № 477—74. Деп., 1974.
6. Капель Г.И., Уткин А.В., Фортгов В.Е. Уравнения состояния и макрокинетика разложения твердых взрывчатых веществ в ударных и детонационных волнах. — Черногоровка: ОИХФ, 1989. — 106 с.
7. Агурейкин В.А., Вopilov A.A., Кульков О.Н. Программный комплекс "ПОТОК-ЕС" / Руководство по эксплуатации. — Новосибирск: ИПФ, 1987.
8. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. — М.: Недра, 1988. — 358 с.
9. Михайлюк К.М. Природа критического диаметра детонации неомогенных взрывчатых веществ. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. к. ф.-м. н. — Черногоровка: ОИХФ, 1980.

Новосибирский государственный
технический университет

Поступила в редакцию 8/X 1993 г.