

УДК УДК 662.215.1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ НА ПРОЦЕСС ДЕТОНАЦИИ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

И. А. Балаганский¹, А. В. Виноградов¹, Л. А. Мержиевский^{2,1},
А. Д. Матросов², И. А. Стадниченко²

¹Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск
balaganskij@corp.nstu.ru

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Выполнен анализ влияния материала оболочки (меди и карбида кремния) на процесс детонации цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ). Отмечены существенные различия волновых картин как в продуктах детонации, так и в оболочках, что связано с различием скоростей звука и быстрым разрушением керамики при взрывном нагружении. Выявлены особенности волновой картины на границе раздела ВВ/керамика, связанные с десенсибилизацией ВВ вследствие его нагружения опережающей волной со стороны оболочки, которые проявляются в снижении давления, размытости детонационного фронта и повышении массовой скорости. В течение всего процесса происходит непрерывное увеличение времени взрывного разложения вблизи границы раздела ВВ с керамической оболочкой. На оси симметрии за детонационным фронтом заряда ВВ в керамической оболочке наблюдается затянута область с постоянным давлением, близким к давлению Чепмена — Жуге.

Ключевые слова: нестационарная детонация, высокомодульная керамика, десенсибилизация, поперечные волны.

DOI 10.15372/FGV20180414

ВВЕДЕНИЕ

По-видимому, первым исследованием, показавшим возможность влиять на детонационные процессы с помощью конструктивных приемов, была работа [1], в которой описан канальный эффект — изменение скорости детонации в зарядах взрывчатых веществ (ВВ) с продольными каналами. Обобщение полученных в этом направлении результатов проведено в работе [2]. Экспериментальное доказательство осуществимости режима саморазгоняющейся детонации в зарядах с инертными вставками дано в [3].

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении связано с использованием элементов из бериллия и высокомодульных керамических материалов, находящихся в контакте с зарядами ВВ. Скорость звука в таких материалах высока и в ряде случаев значительно превышает скорость детонации ВВ. При этом

керамические материалы характеризуются высокими значениями упругого предела Гюгонио (порядка 10 ГПа). Это, по-видимому, и послужило побудительной причиной изучения процессов, возникающих при их взаимодействии с детонационными и ударными волнами.

В частности, в работе [4] описано инициирование химической реакции под действием опережающей детонацию упругой волны в цилиндрической оболочке из стекла или кварца. В качестве объекта исследования был взят порошок мелкоизмельченного перхлората аммония (размер частиц 1 ÷ 5 мкм) с различными взрывчатыми и невзрывчатыми добавками (ТНТ, алюминиевая пудра, ПММА и др.).

В работе [5] изучалось влияние инертной стенки из бериллия и бронзы на распространение детонации в заряде EDC 35 на основе ТАТБ. Было выявлено, что локальная скорость детонации в EDC 35 на границе с инертной стенкой зависит от выбора материала. Для бронзы скорость детонации снижается на 0.6 ± 0.1 %. Для бериллия скорость детонации увеличивается на 1.2 ± 0.1 %, связано это с тонким слоем EDC 35, который предварительно под-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00068).

© Балаганский И. А., Виноградов А. В., Мержиевский Л. А., Матросов А. Д., Стадниченко И. А., 2018.

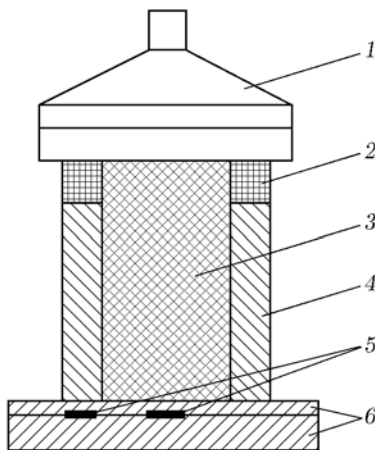


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — ГПВ, 2 — пенопластовое кольцо, 3 — ВВ, 4 — керамическая оболочка, 5 — манганиновые датчики, 6 — медные экраны

вергался ударному нагружению опережающей волной в бериллии до того, как его достигал фронт детонации.

В статье [6] представлены результаты исследования косых детонационных волн на границе раздела ВВ / твердый материал на основе оксида алюминия при нескольких углах падения волн. В ряде экспериментов отмечалось изменение формы фронта детонационной волны вблизи границы раздела. По мнению авторов, это может служить доказательством нестационарности течения вблизи локализации детонационной волны на границе с твердым материалом. Локальное ускорение (или замедление) не изменялось после прохождения детонационной волной дистанции около 100 мм.

В работах [7, 8] экспериментально и теоретически показано, что если скорость звука в инертной оболочке превышает скорость детонации заряда ВВ, то в оболочке распространяется волна сжатия без ударного фронта.

В работах [9–11] зарегистрированы профили давления вдоль оси симметрии цилиндрических зарядов ВВ в оболочках из карбида кремния. Измерялось также давление на торцах керамической оболочки. Схема экспериментальной сборки дана на рис. 1. Измерения проводились с помощью манганиновых датчиков, размещенных между тонкими медными экранами. Первый датчик был установлен на оси симметрии сборки, второй датчик измерял давление на торце керамической оболочки. Длина оболочки 60 мм, внешний диаметр 74 мм, толщи-

Таблица 1

Результаты экспериментов

ВВ	ρ_0 , г/см ³	p_{CJ} , ГПа	D_{CJ} , км/с	Пено- пластовое кольцо	p_{HE} , ГПа	p_c , ГПа
Литой тротил	1.60	19.0	6.9	Нет	24.0	7.5
				Имеется	17.0	15.8
Литой ТГ-40/60	1.67	25.0	8.0	Нет	25.0	11.0
				Имеется	30.8	11.2
Гексоген насыпной плотности	1.10	10.0	6.3	Нет	12.5	12.0
				Имеется	10.0	3.2

на 13 мм. Детонация возбуждалась с помощью генератора плоской волны, который обеспечивал время выхода детонации на стационарный режим не более 1 мкс.

Пенопластовое кольцо служило для демпфирования удара по торцу керамической оболочки. Результаты экспериментов приведены в табл. 1: параметры Чепмена — Жуге для стационарной детонации исследуемых ВВ (p_{CJ} , D_{CJ}) и максимальные давления в ВВ (p_{HE}) и керамической оболочке (p_c), пересчитанные по ударным адиабатам из меди на ВВ. Анализ результатов показал, что давления, измеренные центральными датчиками, зависят от начальных условий. Таким образом, опережающие волны в оболочке влияют на детонационный процесс.

Профили давления в заряде ВВ ТГ-40/60 с демпфирующим кольцом приведены на

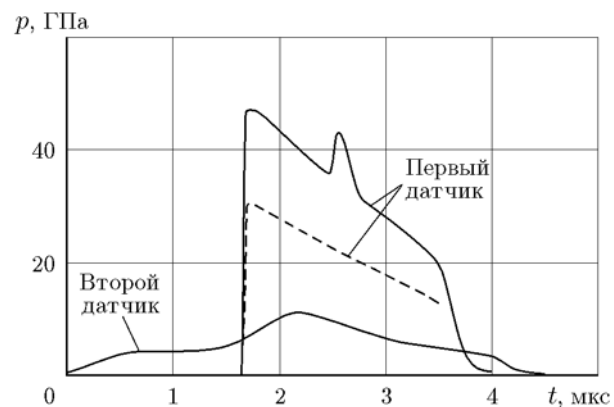


Рис. 2. Профили давления в литом цилиндрическом заряде с кольцом ТГ-40/60:

сплошные линии — записи датчиков; штриховая линия — пересчет на ВВ

рис. 2 — записи датчиков в медных экранах и результаты пересчета экспериментальных данных на значения давления в ВВ. Предполагалось, что регистрируемый по оси симметрии второй пик давления связан с циркуляцией волн в медных экранах, и поэтому при пересчете показаний на ВВ он не учитывался.

В работе [12] описаны результаты исследования распространения детонационной волны вдоль границы раздела ВВ / карбид кремния. По мнению авторов, 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 детонационному фронту со скоростью ≈ 6 км/с и оказывающих влияние на параметры детонации. При этом реакция ВВ на действие поперечных волн определяется начальной скоростью разложения ВВ непосредственно за фронтом детонационной волны, которая тесно связана с критическим диаметром детонации ВВ.

Целью данной работы являлся анализ влияния материала оболочки на детонацию заряда ВВ. Сравнивались результаты численного моделирования процессов детонации в зарядах ВВ, помещенных в медную или керамическую оболочку. Поведение ВВ описывалось с использованием кинетики Ли — Тарвера, позволяющей воспроизводить нестационарные процессы инициирования и распространения детонации.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование выполнялось с использованием программного комплекса ANSYS AUTODYN x64 v15.0 (+Beta Options) Double Precision [13].

Постановки задач соответствовали экспериментам [9–11]. Начальная конфигурация расчетной области размером 13.0×3.7 см дана на рис. 3. Конфигурация соответствует рис. 1, но длина сборки примерно в два раза больше. Моделирование проводилось в осесимметричной лагранжевой постановке. Нижняя граница расчетной области являлась осью симметрии. Пространственное разрешение при постановке задач составляло 10 ячеек лагранжевой сетки на 1 мм. Выбор меди в качестве альтернативного материала оболочки обусловлен тем, что

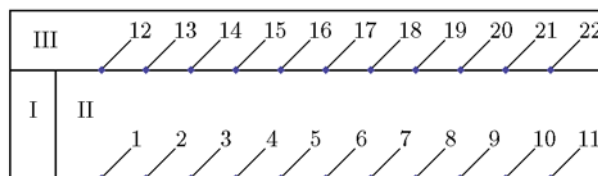


Рис. 3. Начальная конфигурация расчетной области длиной 13.0 см и радиусом 3.7 см:

I — шашка-инициатор (Composition B, $\rho = 1.72$ г/см³, JWL); II — основной заряд ВВ (Composition B, $\rho = 1.63$ г/см³, кинетика Ли — Тарвера), III — оболочка (медь/карбид кремния); 1–22 — лагранжевы датчики

она имеет акустическую жесткость, практически совпадающую с жесткостью карбида кремния.

При постановке задавались начальные координаты лагранжевых датчиков, в которых при счете сохранялась информация о параметрах течений в зависимости от времени. Датчики размещались с шагом 1 см на оси симметрии заряда и в ВВ на границе его раздела с оболочкой, как показано на рис. 3. Иницирование осуществлялось волной с плоским фронтом.

Характеристики определяющих соотношений, участвующих в расчете тел, в терминологии AUTODYN даны в табл. 2. Для всех материалов, кроме основного заряда ВВ, параметры определяющих соотношений взяты из стандартной библиотеки AUTODYN. Основные параметры для расчета кинетики Ли — Тарвера для основного заряда ВВ Composition B (аналог состава ТГ-40/60) приведены в табл. 3.

Впервые модель Ли — Тарвера была описана в [16] и модифицирована в работе [17].

Таблица 2
Характеристики уравнений состояния, участвующих в расчете тел

Material Name	Equation of State	Strength	Failure
Composition B	JWL	None	None
Composition B Urtiew*	Lee — Tarver	von Mises	None
Copper	Shock	Johnson Cook	None
SiC	Polynomial	Johnson Holmquist	Johnson Holmquist

*Параметры подобраны по результатам [14, 15].

Таблица 3
Основные параметры для расчета кинетики
ВВ Composition В Urtiew

Исходное ВВ (JWL)	Продукты детонации (JWL)
$A = 1479$ Мбар	$A = 5.308$ Мбар
$B = -0.05261$ Мбар	$B = 0.0783$ Мбар
$R_1 = 12$	$R_1 = 4.5$
$R_2 = 12$	$R_2 = 1.2$
$\omega = 0.912$	$\omega = 0.34$
$C_V = 2.487 \cdot 10^{-5}$ Мбар/К	$C_V = 1.0 \cdot 10^{-5}$ Мбар/К
$T_0 = 298$ К	С-J Energy/unit volume $E_{0g} = 0.081$ Мбар
Модуль сдвига 0.035 Мбар	Скорость стационарной детонации 7.576 мм/мкс
Предел текучести 0.002 Мбар	Давление Чепмена — Жуге 0.265 Мбар
Начальная плотность 1.63 г/см ³	—
Параметры в кинетическом соотношении	
$a = 0.0367$	$x = 7.0$
$b = 0.667$	$y = 2.0$
$c = 0.667$	$z = 3.0$
$d = 0.333$	$F_{ig\max} = 0.022$
$e = 0.222$	$F_{G_1\max} = 0.7$
$g = 1.0$	$F_{G_2\min} = 0.0$
$I = 4.0 \cdot 10^6$ мкс ⁻¹	$G_1 = 140$ Мбар ⁻² · мкс ⁻¹
—	$G_2 = 1000$ Мбар ⁻³ · мкс ⁻¹

Модель использует два уравнения состояния JWL (одного вида, но с разными значениями констант) — одно для описания исходного ВВ, другое для описания продуктов взрыва:

$$p = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + \omega C_V T / V,$$

где p — давление, V — удельный объем, T — температура, ω — коэффициент Грюнайзена, C_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме, A, B, R_1, R_2 — константы.

Само кинетическое соотношение записывается в следующем виде [17]:

$$\frac{dF}{dt} = I(1-F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x +$$

$$+ G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^g p^z,$$

где F — доля прореагировавшего ВВ, t — время, ρ — текущая плотность, ρ_0 — начальная плотность, $I, G_1, G_2, a, b, c, d, e, g, x, y, z$ — константы. Этот трехчленный закон описывает три стадии реакции при ударно-волновом инициировании и детонации гетерогенных ВВ. Первый член описывает зажигание ВВ при его сжатии, т. е. создание горячих точек, он меняется в пределах $0 < F < F_{I\max}$. Второй член описывает медленный рост изолированных друг от друга горячих областей, меняется в пределах $0 < F < F_{G_1\max}$. Третий член описывает быстрое окончание реакции после коалесценции горячих областей, меняется в пределах $F_{G_2\min} < F < 1$. В первый член включена величина сжатия исходного ВВ a для начала процесса горения, с тем чтобы модель можно было использовать для расчета как в случае изэнтропического и многократного ударного сжатия, так и в случае однократного ударного сжатия.

Параметры в кинетическом соотношении для основного заряда подобраны и тщательно протестированы при моделировании процесса образования волны Маха при сжатии детонационной волны к оси заряда [18] и при моделировании процесса десенсибилизации ВВ после нагружения опережающей волной как с ударным, так и без ударного фронта [19].

Результаты моделирования приведены далее в виде изолиний полей течения, пространственных и временных графиков.

На рис. 4 представлены поля течения и изолинии давления в момент времени $t =$

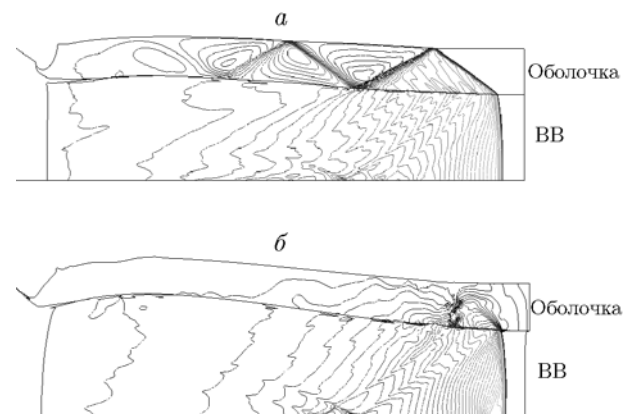


Рис. 4. Поля течений и изолинии давления в момент времени $t = 15.75$ мкс:

a — медная оболочка, b — керамическая оболочка

15.75 мкс в зарядах с медной и керамической оболочкой. Видны значительные различия волновых картин как в продуктах детонации, так и в оболочках, что связано с различием скоростей звука и быстрым разрушением керамики при взрывном нагружении. На рис. 4, б торец оболочки смещен относительно заряда ВВ вследствие того, что волна в оболочке достигает торца и отражается в виде волны разрежения раньше, чем детонационный фронт. Значения давления в ВВ могут быть определены с помощью приведенных ниже графиков.

ВОЛНОВЫЕ КОНФИГУРАЦИИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВВ/ОБОЛОЧКА

На рис. 5 даны профили давления в заряде ВВ на границе раздела с медной и керамической оболочкой на отрезке 11 ÷ 13 см в момент

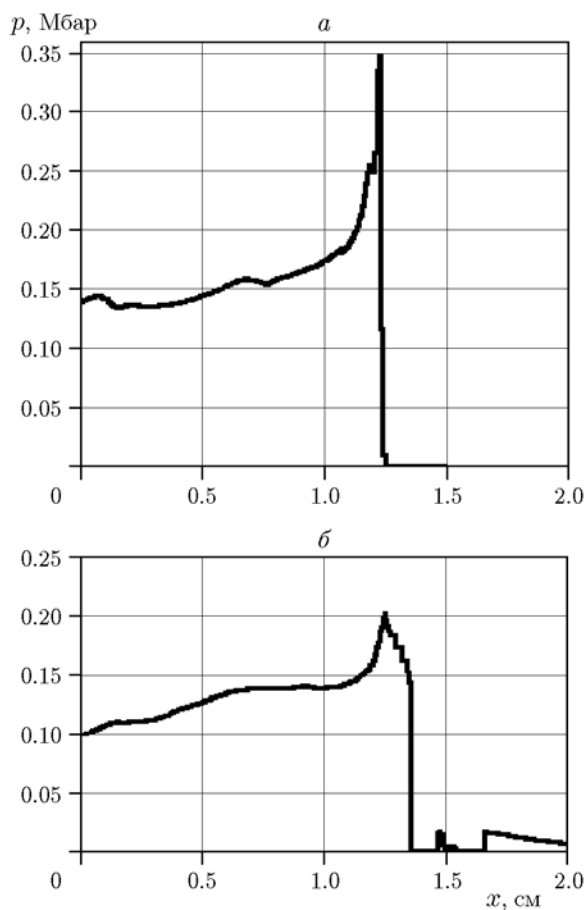


Рис. 5. Профили давления на границе раздела ВВ с оболочкой на отрезке $x = 11 \div 13$ см в момент времени $t = 15.75$ мкс:

a — медная оболочка, *б* — керамическая оболочка

времени $t = 15.75$ мкс. Значительное по сравнению с оболочкой из меди снижение давления и размытость фронта волны в заряде в оболочке из карбида кремния свидетельствуют о десенсибилизации ВВ в керамической оболочке [20–23] при его нагружении опережающей волной.

На рис. 6 и 7 приведены изменения во времени давления и массовой скорости в лагранжевых точках в зарядах ВВ на границе раздела с медной и керамической оболочкой. Если в медной оболочке процесс детонации стационарен, что подтверждается постоянством давления и массовой скорости на детонационном фронте по длине заряда, то в заряде с оболоч-

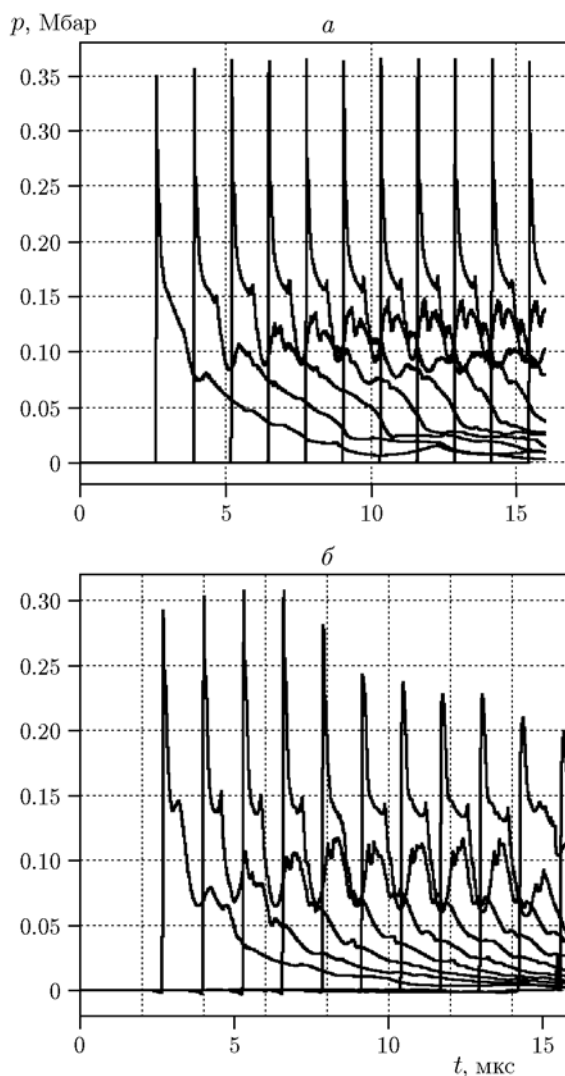


Рис. 6. Профили давления в лагранжевых точках 12–22 (см. рис. 3) на границе раздела:

a — медная оболочка, *б* — керамическая оболочка

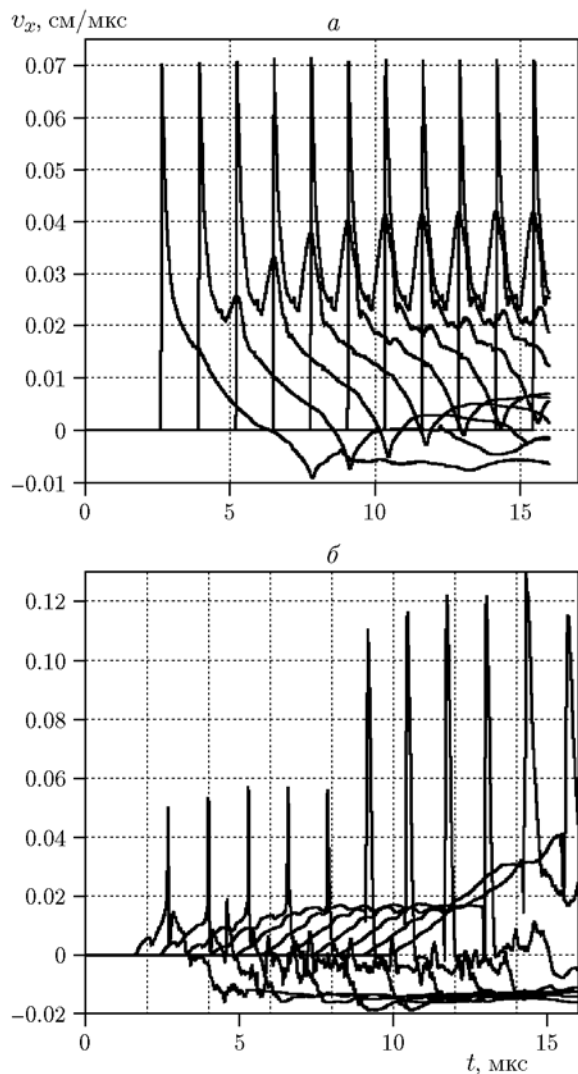


Рис. 7. Профили массовой скорости в лагранжевых точках 12–22 (см. рис. 3) на границе раздела:

a — медная оболочка, *б* — керамическая оболочка

кой из карбида кремния давление непрерывно снижается, а массовая скорость растет.

На рис. 8 приведены поля течения и изолинии давления в момент времени $t = 15.75$ мкс в зоне взаимодействия детонационного фронта с медной и керамической оболочкой. Волновые картины в окрестности границы ВВ с оболочкой наглядно различаются. На самой границе с керамической оболочкой хорошо заметно локальное опережение, а затем локальное отставание детонационного фронта с зарождением и развитием искажения его формы.

Рис. 9 иллюстрирует длительность дето-

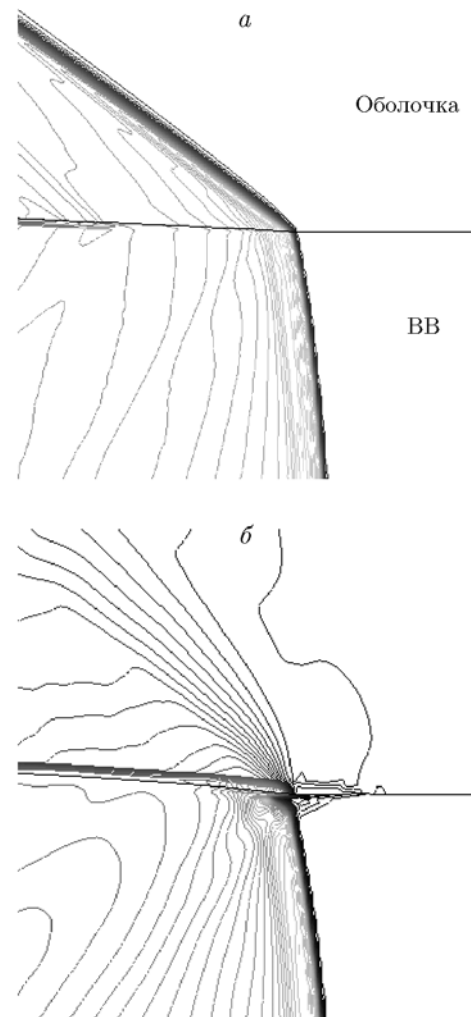


Рис. 8. Поля течений и изолинии давления в момент времени $t = 15.75$ мкс (увеличено):

a — медная оболочка, *б* — керамическая оболочка

национного превращения в местах расположения датчиков. Темные прямоугольники показывают продолжительность полного разложения ВВ. Видно, что на оси симметрии заряда длительность детонационного превращения практически постоянна в течение всего процесса в случае как медной, так и керамической оболочки. В то же время на границе раздела ВВ/оболочка длительность детонационного превращения в заряде с керамической оболочкой растет со временем и к моменту $t = 15.75$ мкс достигает 0.44 мкс, что более чем в четыре раза превышает максимальное время взрывчатого превращения на границе раздела в заряде с медной оболочкой.

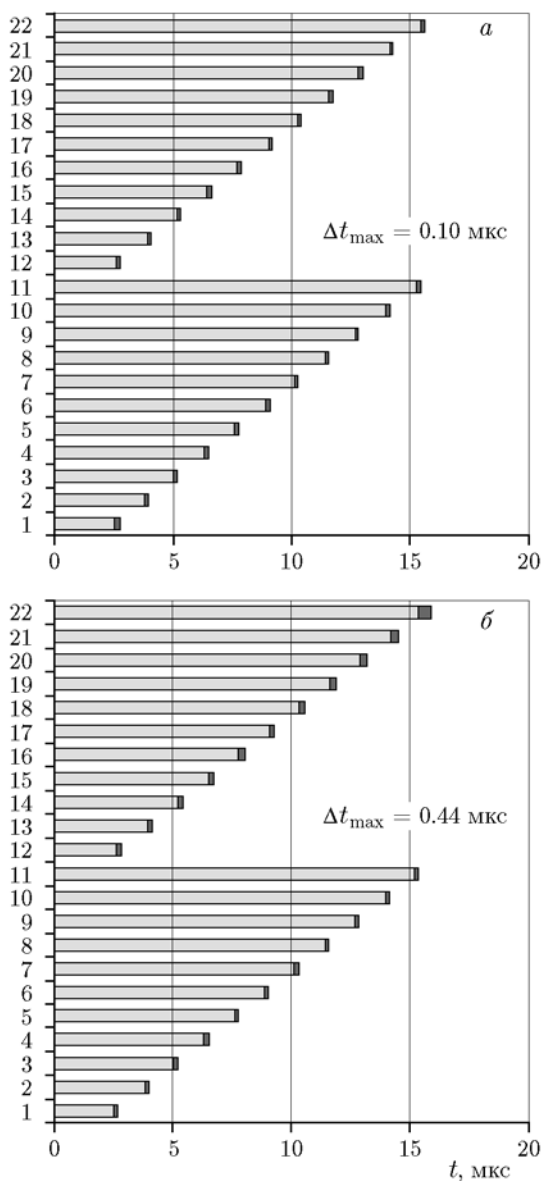


Рис. 9. Длительность детонационного превращения в местах расположения датчиков:

a — медь, *б* — керамика, по вертикали — номера датчиков; ширина темных прямоугольников показывает время полного превращения ВВ

ПЕРЕДАЧА ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ПЕРИФЕРИИ К ОСИ СИММЕТРИИ ЗАРЯДА ВВ

На рис. 10 представлены профили давления за детонационным фронтом на оси симметрии заряда ВВ в момент времени $t = 7.75$ мкс, соответствующий выходу детонационного фронта на торец оболочки длиной 60 мм (см. рис. 1). Давление на фронте детонационной волны для меди 30.8 ГПа, для керамики 31.96 ГПа. Это различие согласуется с экс-

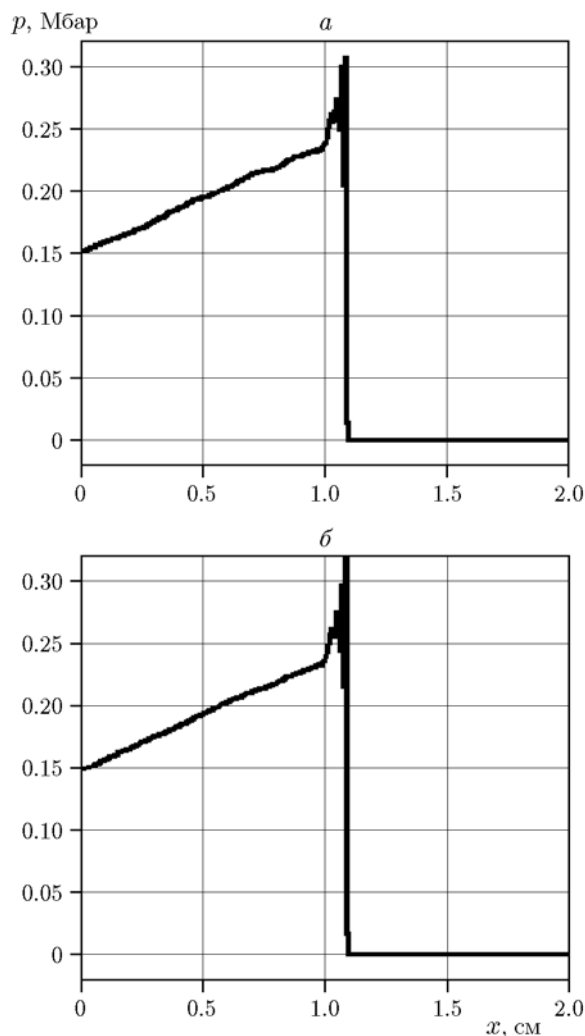


Рис. 10. Профили давления за детонационным фронтом на оси симметрии заряда ВВ в момент времени $t = 7.75$ мкс:

a — медная оболочка, *б* — керамическая оболочка

периментальными данными, приведенными в табл. 1 и на рис. 2, и показывает, что в расчете, так же как и в эксперименте, керамическая оболочка влияет на детонационный процесс.

На рис. 11 даны профили давления за детонационным фронтом на оси симметрии заряда ВВ в момент времени $t = 15.75$ мкс. На рис. 11, *б* за детонационным фронтом заряда ВВ в керамической оболочке хорошо видна затянутая область почти с постоянным давлением, близким к давлению в точке Чепмена — Жуге. При этом из результатов расчета следует, что время разложения ВВ практически такое же, как и для заряда в медной оболочке. Появление этой области обусловлено волной сжатия,

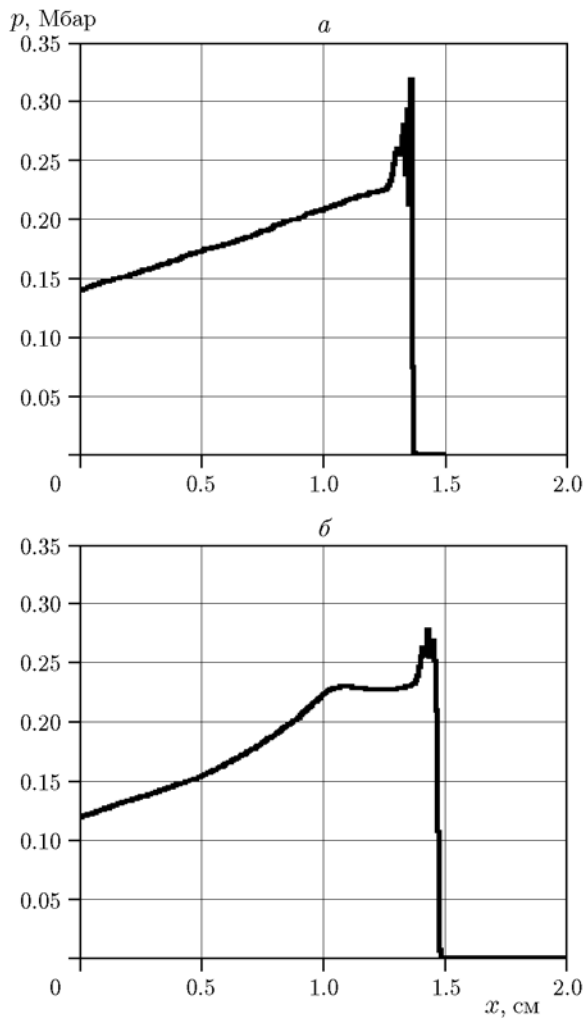


Рис. 11. Профили давления за детонационным фронтом на оси симметрии заряда ВВ в момент времени $t = 15.75$ мкс:

a — медная оболочка, *б* — керамическая оболочка

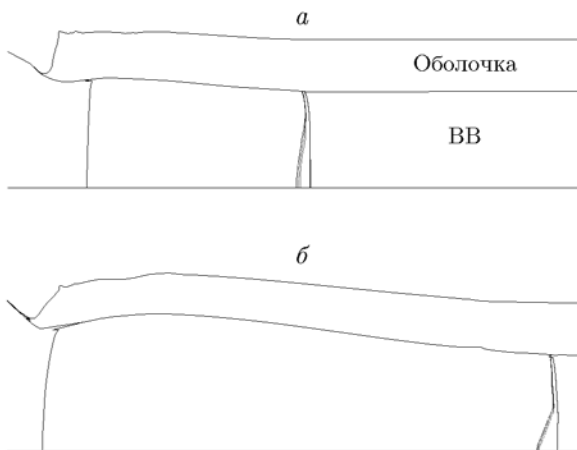


Рис. 12. Поперечные волны в заряде ВВ вблизи детонационного фронта в моменты времени $t = 7.75$ (*a*) и 15.75 мкс (*б*)

пришедшей с периферии заряда, т. е. со стороны оболочки. Давление на фронте детонационной волны в заряде с керамической оболочкой в данном случае значительно ниже, чем на фронте волны в заряде с медной оболочкой.

На рис. 12 показаны последовательные стадии возникновения и развития поперечных волн на детонационном фронте в заряде с керамической оболочкой. Для наглядности приведены всего четыре изолинии давления с нижней границей 21.5 ГПа и верхней границей 23 ГПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ влияния материала оболочки (меди и карбида кремния) на процесс детонации цилиндрического заряда ВВ.

Проведено сравнение результатов численного моделирования с опубликованными экспериментальными данными. Показано, что основные особенности процесса воспроизводятся при численном моделировании с использованием кинетики Ли — Тарвера. Отличия экспериментальных и расчетных данных могут быть объяснены влиянием счетной искусственной вязкости на процессы, связанные с кинетической неустойчивостью детонационного фронта.

Несмотря на практически одинаковую динамическую жесткость материалов оболочек, наблюдаются значительные различия волновых процессов в продуктах детонации и в оболочках, что связано с различием скоростей звука в меди и карбиде кремния и быстрым разрушением керамики при взрывном нагружении.

Выявлен физический механизм, ответственный за особенности волновой картины на границе раздела ВВ/керамика, связанный с десенсибилизацией ВВ вследствие его нагружения опережающей волной со стороны оболочки, который приводит к снижению давления, размытости детонационного фронта и повышению массовой скорости. В течение всего процесса происходит непрерывное увеличение до четырех раз времени взрывного разложения на границе раздела ВВ/оболочка. Таким образом, вблизи границы реализуется нестационарный детонационный режим.

На оси симметрии за детонационным фронтом заряда ВВ в керамической оболочке наблюдается затянута область почти с постоянным давлением, близким к давлению Чепмена — Жуге. При этом из результатов расчета

следует, что время разложения ВВ на оси симметрии этого заряда практически такое же, как и для заряда в медной оболочке.

Подтвержден механизм передачи возмущений от периферии к оси симметрии заряда ВВ за счет поперечных волн, распространяющихся позади детонационного фронта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Woodhead D. W. Velocity of detonation of a tubular charge of explosive // *Nature*. — 1947. — V. 160, N 4071. — P. 644.
2. Митрофанов В. В. О сверхскоростной детонации в зарядах с продольными каналами // *Физика горения и взрыва*. — 1975. — Т. 11, № 1. — С. 73–81.
3. Мержиевский Л. А., Фадеенко Ю. И., Филлимонов В. А., Чистяков В. П. Ускоренное распространение детонации в зарядах с полостью, заполненной литием // *Физика горения и взрыва*. — 1976. — Т. 12, № 2. — С. 233–240.
4. Карпунин И. А., Балинец Ю. М., Боболев В. К., Степашкин Б. П. Иницирование быстрых химических реакций в твердых смешанных ВВ упругой волной в цилиндрической оболочке // *Детонация*. — Черногоровка, 1977. — С. 83–85.
5. Eden G., Belcher R. A. The effects of inert walls on the velocity of detonation in EDC 35, an insensitive high explosive // *Proc. 9th Intern. Symp. on Detonation*. — 1989. — V. 1. — P. 831–841.
6. Aveille J., Carion N., Vacellier J., Servas J. M. Experimental and numerical study of oblique interaction of detonation waves with explosive/solid material interfaces // *Proc. 9th Intern. Symp. on Detonation*. — 1989. — V. 1. — P. 842–852.
7. Neal T. R. Perpendicular explosive drive and oblique shocks // *Proc. 6th Symp. on Detonation*. — 1976. — P. 602–611.
8. Sharpe G. J., Bdzil J. B. Interactions of inert confiners with explosives // *J. Eng. Math.* — 2006. — V. 54. — P. 273–298.
9. Балаганский И. А., Бердник В. П., Куликова И. В., Носенко Н. И., Соловьев В. С. Особенности детонационных процессов в зарядах ВВ, находящихся в контакте с высокомолекулярной керамикой // *Аннотации докл. Седьмого Всесоюз. съезда по теоретической и прикладной механике*. — М., 1991. — С. 31–32.
10. Балаганский И. А., Кобылкин И. Ф., Разоренов С. В., Соловьев В. С., Уткин А. В. Влияние оболочки из карбида кремния на детонационные параметры в зарядах ВВ // *Сб. докл. 5 Всесоюз. совещания по детонации*. — Красноярск, 1991. — Т. 2. — С. 345–350.
11. Balagansky I. A., Razorenov S. V., Utkin A. Detonation parameters of condensed high explosive charges with long ceramic elements // *Final Proc. 10th Intern. Detonation Symp.* — 1993. — P. 841–845.
12. Балаганский И. А., Агурейкин В. А., Разоренов С. В., Уткин А. В. Влияние инертной стенки из высокомолекулярной керамики на распространение детонации в зарядах конденсированных ВВ // *Физика горения и взрыва*. — 1994. — Т. 30, № 5. — С. 107–114.
13. ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide. — ANSYS, Inc. Release Southpointe, 2016.
14. Murphy M. J., Lee E. L., Weston A. M., Williams A. E. Modeling shock initiation in Composition B // *Proc. 10th Intern. Detonation Symp.* — 1993. — P. 963–970.
15. Urtiew P. A., Vandersall K. S., Tarver C. M., Garcia F., Forbes J. W. Shock initiation experiments and modeling of Composition B and C-4 // *Proc. 13th Intern. Detonation Symp.* — 2007. — P. 929–939.
16. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // *Phys. Fluids*. — 1980. — V. 23. — P. 2362–2372.
17. Tarver C. M., Hallquist J. O., Erickson L. M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives // *Proc. 8th Symp. (Intern.) on Detonation*. — 1985. — P. 951–961.
18. Balagansky I. A., Hokamoto K., Manikandan P., Matrosov A. D., Stadnichenko I. A., Miyoshi H., Bataev I. A., Bataev A. A. Mach stem formation in explosion systems, which include high modulus elastic elements // *J. Appl. Phys.* — 2011. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.3671063>.
19. Balagansky I. A., Stepanov A. A. Numerical simulation of Composition B high explosive charge desensitization in gap test assembly after loading by precursor wave // *Shock Waves*. — 2016. — V. 26. — P. 109–115.
20. Jacobs S. J. Non-steady detonation // *Proc. 3rd Symp. on Detonation*. — 1960. — P. 784–812.
21. Campbell A. W., Davis W. C., Ramsay J. B., Travis J. R. Shock initiation of solid explosives // *Phys. Fluids*. — 1961. — V. 4. — P. 511–521.
22. Campbell A. W., Travis J. R. The shock desensitization of PBX-9404 and Composition B-3 // *Proc. 8th Symp. (Intern.) on Detonation*. — 1985. — P. 1057–1068.
23. Davis W. C. Shock desensitizing of solid explosive // *Proc. 14th Intern. Detonation Symp.* — 2010. — P. 1058–1064.

Поступила в редакцию 6/III 2017 г.,
в окончательном варианте — 12/XII 2017 г.