

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 535.529+662.215.1

НИЗКОСКОРОСТНЫЕ РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ ЗЕРНЕНОГО ПИРОКСИЛИНОВОГО ПОРОХА

© 2014 г. Б. С. Ермолаев*, В. Ф. Мартынюк, А. А. Беляев, А. А. Сулимов

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

*E-mail: boris.ermolaev@yahoo.com

Поступила в редакцию 03.06.2013

Известно, что низкоскоростная детонация, возбуждаемая взрывом тонкого слоя пластичного ВВ в зарядах зерненого пироксилинового пороха, распространяется с практически постоянной по длине заряда скоростью, которая, однако, имеет различные значения в зависимости от мощности инициирующего импульса. Данная работа посвящена выяснению механизма этого необычного свойства детонационного процесса. Опыты проводились на зарядах из зерненого одноканального пороха марки ВТМ разной начальной плотности и были дополнены численным моделированием. Показано, что изучаемое свойство есть следствие сравнительно низкой интенсивности химического превращения и ограниченной длины заряда (120 мм в эксперименте и расчетах). В этих условиях зона реакции детонационной волны не успевает полностью сформироваться и развитие процесса прерывается на стадии, когда характеристики волны активно изменяются. Эволюция волны отчетливо проявляется на профилях давления, однако траектория фронта, если исключить участок инициирования, имеет почти линейную форму, которой отвечает скорость волны, близкая к постоянной величине. Для формирования стационарной волны, характеристики которой не зависят от условий инициирования в диапазоне, отвечающем режиму низкоскоростной детонации, необходимы заряды гораздо большей длины. Что касается механизма возбуждения химического превращения во фронте волны, то, как показало численное моделирование, в зарядах высокой пористости работает газофазный механизм (сжатие и разогрев в высокоскоростном потоке газов, движущихся в порах). И лишь для уплотненных зарядов с пористостью 0.2 и ниже нагрев и воспламенение пороха происходят по твердофазному механизму (за счет диссипаций при пластических деформациях пористого слоя). Рассмотрены подробности обоих механизмов.

Ключевые слова: низкоскоростная детонация, пироксилиновый порох.

DOI: 10.7868/S0207401X1406003X

ВВЕДЕНИЕ

Зерновые пироксилиновые пороха относятся к энергетическим материалам, для возбуждения полноценной детонации которых требуется приложить взрывной импульс сравнительно большой амплитуды и длительности [1, 2]. Ранее было показано [3], что при воздействии коротким импульсом, например при инициировании с помощью тонкого слоя пластичного ВВ, используемого в качестве промежуточного детонатора, в заряде зерненого пороха возникают детонационно-подобные процессы, которые из-за уровня скорости волны (1.2–1.8 км/с) традиционно относят к низкоскоростной детонации. Эти волны, которые будут предметом подробного анализа в данной статье, обладают одним свойством, необычным для установившегося детонационного процесса. А именно, скорость волны, которая сохраняется после инициирования постоянной по длине заряда, оказывается зависящей от толщи-

ны слоя инициирующего ВВ. Помимо чисто теоретического интереса эти волны благодаря простоте и надежности инициирования имеют перспективы практического использования в импульсных устройствах с коротким временем срабатывания.

Исследование, представленное в данной статье, содержит экспериментальный и теоретический разделы. Для экспериментов выбран зерненный одноканальный пироксилиновый порох марки ВТМ. Проведены измерения скорости неидеальной детонации зарядов насыпной и более высокой плотности при разной толщине инициирующего слоя ВВ, а также даны оценки степени выгорания пороховых частиц, погашенных и собранных после прохождения детонационной волны. В теоретическом разделе с помощью численного моделирования рассмотрен механизм исследуемого процесса и его основные свойства. Использована модель, разработанная ранее применительно к переходу горения в детонацию в

твердых пористых энергетических материалах (ЭМ) [4]. Взрывное инициирование моделируется импульсным вдувом горячего газа через торец заряда. Варьируя длительность вдува, можно качественно воспроизвести эффект изменения толщины слоя инициирующего ВВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Опыты проводились на пироксилиновом порохе марки ВТМ, имеющем вид одноканальных зерен диаметром 0.9 мм и длиной 1.5 мм. Удельная поверхность зерен равна $38 \text{ см}^2/\text{г}$, гидравлический диаметр зерен – 1 мм. Зерна пороха покрывали по наружной поверхности тонкой пленкой поливинилацетата из расчета 1 вес. %. Пленку наносили путем напыления из спиртового раствора, затем зерна сушили и использовали для приготовления зарядов. Заряды прессовали с подогревом, порционно, непосредственно в канал оболочки. Навески пороха выбирали таким образом, чтобы высота каждой запрессовки была примерно равна диаметру. Заданную плотность заряда получали, поддерживая постоянными давление на прессе, температуру прессования и создавая при каждой запрессовке выдержку в 1 мин. Равномерность плотности по высоте заряда проверяли, измеряя прирост высоты заряда после каждой запрессовки. Разброс не превышал $\pm 0.02 \text{ г}/\text{см}^3$ от средней плотности заряда. Оболочки изготавливали из прочной стали в виде цилиндра со сквозным каналом. В опытах с прессованными зарядами использовали оболочки длиной 120 мм, для зарядов насыпной плотности использовали оболочки длиной 200 мм. Диаметр канала варьировали от 7 до 40 мм, толщина стенок равнялась 10 мм. Несколько опытов проведено с другой толщиной стенок – от 5 до 15 мм. Для инициирования использовали тонкий слой пластичного ВВ марки ЭВВ-34 на основе тэна. Кругок ВВ заданной толщины с диаметром, равным диаметру канала, укладывали на верхний торец заряда. Сверху размещалась заглушка из дюралюминия, имеющая углубление по центру под капсулю-детонатор. От капсуля до слоя инициатора по оси заглушки имелось сквозное отверстие диаметром 2 мм, которое также заполнялось пластиковым ВВ. Процесс детонации регистрировали с помощью скоростного фоторегистратора ЖФР-3 через ряд отверстий в стенках оболочки диаметром 1.5 мм, просверленных с шагом в 20 мм. Для усиления свечения продуктов детонации в отверстия вставляли отрезки оптического волокна.

В первой серии опытов проверяли влияние толщины стенок оболочки на свойства детонационного процесса. Использовались заряды плотностью $1.18 \text{ г}/\text{см}^3$ с диаметром канала оболочки – 23 мм и толщиной инициирующего слоя ВВ – 1 мм. При толщине стенок оболочки 5 мм скорость волны

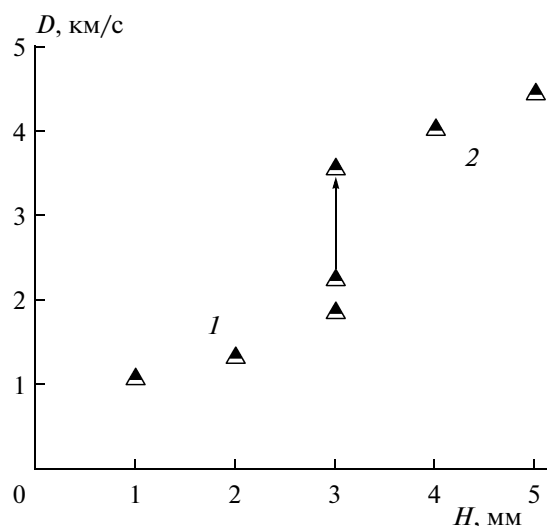


Рис. 1. Зависимость скорости детонации зарядов из пороха марки ВТМ насыпной плотности от толщины слоя инициирующего ВВ. Оболочки с каналом 20 мм в диаметре и 200 мм длиной: 1 – область низкоскоростной детонации, 2 – область нормальной детонации. Стрелкой указан процесс, в ходе которого наблюдалось скачкообразное увеличение скорости.

реакции быстро снижается от 1.6 км/с (сразу после инициирования) до 0.5 км/с на расстоянии менее одной трети заряда. При толщине стенок 7.5, 10 и 15 мм детонация распространяется на всю длину заряда с постоянной скоростью, равной 1.3, 1.35 и 1.45 км/с соответственно. Все последующие опыты проводились в оболочках с толщиной стенок, равной 10 мм.

В следующей серии опытов определили влияние диаметра канала оболочки на свойства процесса. Использовались заряды насыпной плотности (около $0.85 \text{ г}/\text{см}^3$) при толщине инициирующего слоя 1 мм. Критический диаметр канала – чуть менее 10 мм, заряд этого диаметра детонирует устойчиво со скоростью около 1.1 км/с. В зарядах меньшего диаметра детонация затухает. В зарядах большего диаметра детонация распространяется устойчиво, но скорость детонации, хотя и возрастала, но довольно слабо, составив 1.2–1.3 км/с для диаметра 20 мм и 1.5 км/с для диаметра 40 мм.

Влияние толщины инициирующего слоя на свойства процесса рассмотрено на зарядах насыпной плотности диаметром 20 мм. Результаты измерений даны на рис. 1. При толщине слоя 1 и 2 мм наблюдается низкоскоростной процесс со скоростью 1.1 и 1.35 км/с соответственно. При толщине 3 мм в одном опыте детонационный процесс прошел по всей длине заряда со скоростью 1.8 км/с. В двух других опытах процесс, пройдя часть заряда со скоростью около 2.2 км/с, затем скачком увеличил свою скорость до 3.6 км/с. При толщине 4 и

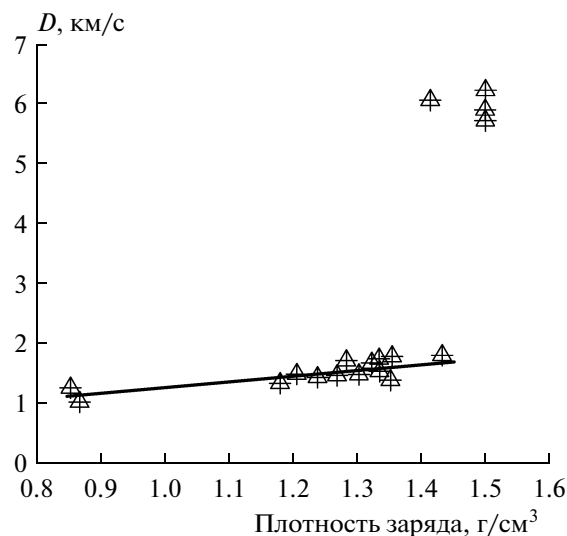


Рис. 2. Зависимость скорости детонации зарядов из пороха марки ВТМ от плотности заряда. Оболочки с каналом 20 мм в диаметре и 120 мм длиной, толщина инициирующего заряда — 1 мм.

5 мм наблюдался детонационный процесс со скоростью 4.0 и 4.5 км/с соответственно.

Влияние плотности заряда на свойства процесса было рассмотрено на зарядах диаметром 20 мм при толщине инициирующего слоя 1 мм. Результаты измерения скорости детонации даны на рис. 2. В диапазоне плотности от насыпной до 1.4 г/см³ скорость детонации возрастает, изменяясь от 1.1 до 1.5 км/с. При плотности 1.45 г/см³ опыты дают либо низкоскоростную детонацию, либо полноценную детонацию со скоростью 6 км/с. При плотности 1.5 г/см³ (начальная пористость — около 6%) наблюдается только детонация со скоростью около 6 км/с. В целом, увеличение плотности заряда облегчает инициирование.

Наконец, были проведены опыты по отбору и анализу обгоревших гранул пороха, которые улавливались после прохождения детонационной волны по заряду с помощью водяной ловушки — емкости с водой. Емкость устанавливалась по оси заряда на расстоянии 40 мм от открытого торца оболочки, противоположного месту инициирования. Обгоревшие неразрушенные гранулы пороха, оставшиеся в ловушке после опыта, собирали, сушили, взвешивали, определяли средний вес одной обгоревшей гранулы и сравнивали со средним весом исходных гранул пороха. Анализ под микроскопом показывает, что зерна горели равномерно; отчетливо видно увеличение диаметра канала. Результаты обмеров для шести опытов в виде зависимости доли сгоревшего пороха от скорости детонации, измеренной в опыте, приведены на рис. 3. Видно, что доля сгоревшего пороха коррелирует со скоростью детонации, увеличива-

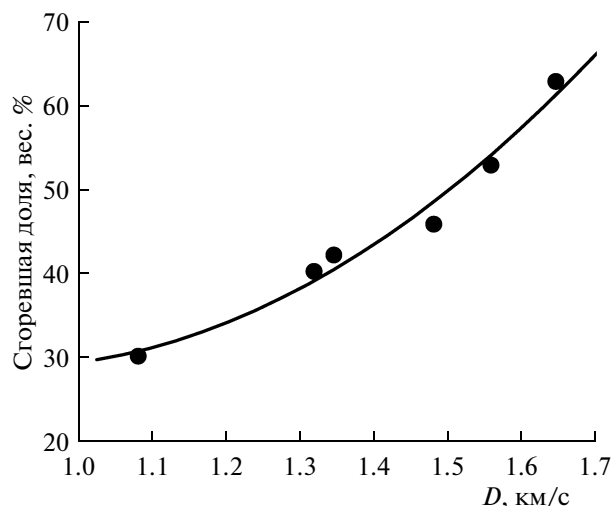


Рис. 3. Средняя доля убитой массы пороховых зерен, погашенных в водяной ловушке после прохождения детонационной волны, в зависимости от скорости детонации. Заряды насыпной плотности, диаметр канала — 20 мм.

ясь от 30 до 65 вес. % по мере роста скорости детонации от 1.1 до 1.7 км/с.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для численного моделирования использовали компьютерную программу, разработанную ранее применительно к переходу горения в детонацию в пористых ЭМ [4]. Модель была опробована на пироксилиновых порохах. Расчеты дали согласие с экспериментом по деталям механизма переходного процесса и зависимостям длины преддетонационного участка и характеристик конвективного горения от размера частиц пороха, начальной пористости порохового заряда, свойств оболочки и условий инициирования. Основные положения и уравнения модели, а также метод их численного интегрирования можно найти в [4]. Здесь мы дадим лишь краткое описание модели.

Рассматриваемый заряд состоит из сферических зерен пороха одинакового диаметра, которые помещены в цилиндрический канал стальной оболочки с закрытыми торцами. Горение инициируется одним из двух способов. В первом способе, который мы назовем “мягким инициированием”, в начальный момент времени небольшая часть заряда у одного из торцов оболочки начинает гореть по поверхности гранул. Этот способ качественно воспроизводит режимы инициирования спиралью накаливания, введенной в канал оболочки, или наружным нагревателем, который размещается на торце оболочки. При втором способе, который назовем “жестким” инициированием, заряд поджигается потоком горячих газов, вдуваемых через торец в течение заданного вре-

мени. Условия инициирования можно изменять в широком диапазоне, варьируя энергию, плотность потока и продолжительность вдува газов. Этим способом можно приближенно моделировать инициирующие воздействия, создаваемые пороховыми инициирующими устройствами, газовой детонацией, а также взрывом тонкого слоя ВВ.

Горение заряда рассматривается в квазиодномерном приближении (т.е. с учетом возможного радиального расширения канала оболочки) в рамках механики двухфазной реагирующей среды. Зерна пороха составляют твердую фазу, которая ведет себя как идеальное вязкопластическое тело. Продукты горения вместе с газом, первоначально заполнявшим поры, и газом, вдуваемым на стадии инициирования, составляют газовую фазу. Пористость, т.е. объемная доля газовой фазы, определяет соотношение фаз среды. Каждая фаза имеет свою внутреннюю энергию, температуру, плотность, скорость течения и подчиняется своему уравнению состояния (двучленное уравнение с постоянным коэффициентом Грюнайзена для газовой фазы и уравнение Тэта, определяющее сжимаемость твердой фазы [5]). Давление твердой фазы отличается от давления в газе на величину, определяемую межгранулярным взаимодействием частиц пороха друг с другом. Все характеристики фаз, как это принято в механике сплошных сред, получаются формальным осреднением по объему, содержащему много частиц пороха, хотя число этих частиц, очевидно, не может быть столь же большим, как число молекул в кинетической теории газов. Модель учитывает следующие процессы: фильтрационное течение газа в порах; передачу тепла конвекцией от газа к поверхности частиц пороха; движение твердой фазы под действием возникающих напряжений, в ходе которого происходят уплотнение (уменьшение пористости) и вязкопластический разогрев твердой фазы; воспламенение и горение пороховых зерен; а также радиальное пластическое расширение канала оболочки, когда давление становится выше предела прочности оболочки.

Зажигание пороха происходит, когда в результате нагрева температура поверхности гранул достигает заданной температуры воспламенения. Нагрев осуществляется под действием двух факторов: конвективной передачи тепла от горячих газов и вязкопластического разогрева при схлопывании пор. Эти факторы могут действовать совместно или по отдельности. Горение происходит по наружной поверхности зерен пороха, массовая скорость горения равна произведению линейной скорости послыонного горения (задаваемой как функция давления) и площади удельной поверхности зерен.

Моделирование осуществляется на двух уровнях. Макроуровень составляют уравнения нераз-

рывности, движения, сохранения энергии и состояния для двухфазной среды. Мезоуровень представлен элементарной ячейкой, которая воспроизводит пору и окружающий ее слой пороха. Уравнение теплопроводности, примененное к этой ячейке, определяет распределение температуры и вязкопластическую генерацию тепла в слое пороха, окружающем пору, и используется для определения момента зажигания. В целом, модель содержит ряд упрощающих положений, в том числе касающихся условий инициирования, и с ее помощью рассчитываем получить, прежде всего, качественные результаты.

Задача решается численно с использованием неявной разностной схемы с матричной прогонкой и расщеплением на макро- и мезоуровни. Расчетная сетка по длине заряда, однородная в начальный момент времени, трансформируется в ходе вычислений, сгущаясь в зонах, где градиенты переменных возрастают, и разреживаясь там, где градиенты уменьшаются. Расчетная сетка по толщине свода ячейки на мезоуровне привязана к внутренней границе ячейки и имеет шаг, который увеличивается по закону геометрической прогрессии при удалении от этой границы.

Приведем основные входные данные, с которыми проводился расчет в базовом варианте. Далее при обсуждении результатов численного моделирования мы будем приводить лишь варьируемые параметры, отличающиеся от базового варианта. Длина порохового заряда равна 120 мм, диаметр зерен пороха – 1 мм, плотность пороховой массы – 1.6 г/см^3 , начальная пористость $\phi_0 = 0.3$. Статическое межгранулярное напряжение как функция пористости задается эмпирической формулой: $\sigma[\text{МПа}] = 120(1 - \phi/0.47)^{1.1}$. Формула справедлива в диапазоне изменения пористости от 0.4 (пористость насыпного слоя) до 0.05. При меньшей пористости используется условная функция $\sigma[\text{МПа}] = 5.5/\phi$, которая обеспечивает неограниченное возрастание напряжения при стремлении пористости к нулю. Коэффициенты, дающие зависимость плотности пороховой массы от давления по формуле Тэйта, равны: модуль объемного сжатия – 8.5 ГПа, показатель степени – 4.5. Коэффициенты уравнения состояния продуктов детонации: теплота взрыва $e_0 = 4.1 \text{ МДж/кг}$, коэффициент Грюнайзена – 0.4, константы упругой составляющей давления подобраны так, чтобы воспроизводить расчетные характеристики детонационной волны в диапазоне изменения начальной плотности заряда от 0.3 до 1.1 г/см^3 . Реперная точка при плотности 0.95 г/см^3 имеет следующие характеристики: скорость детонации – 5.6 км/с, давление – 8.7 ГПа. Скорость горения пороха, экстраполированная от артиллерийских давлений до давления в 1 ГПа, задана согласно эмпирической функции давления с показателем степени, равным единице: $U_p[\text{см/с}] =$

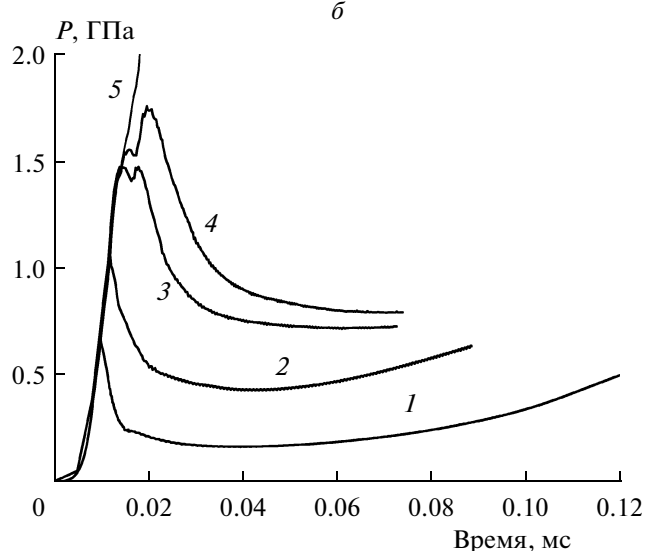
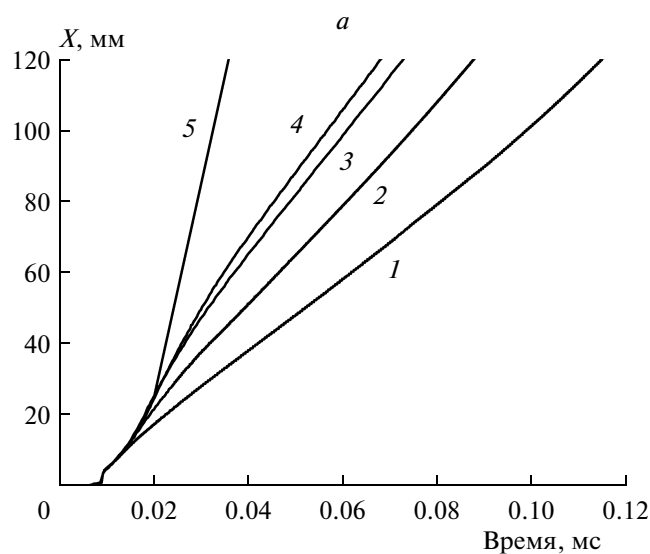


Рис. 4. Траектории фронта волны (а) и временные диаграммы максимального давления (б) в волне, возбуждаемой в заряде длиной 120 мм с начальной пористостью $\phi_0 = 0.3$ при разной длительности инициирующего импульса: 10 (1), 12 (2), 14 (3), 15 (4) и 16 мкс (5).

$= 0.1P$ [МПа]. При давлениях выше 1 ГПа, где можно ожидать ускорение горения в связи с усилением химических реакций за счет объемного разогрева, показатель степени по давлению, следуя выводам работы [6], увеличен до трех.

Обычно в расчетах температура воспламенения пироксилинового пороха принимается равной 600 К. Однако в опытах зерна пороха были покрыты пленкой поливинилацетата толщиной около 2.5 мкм (1% по массе). Чтобы воспламенить порох, пленку нужно удалить, что требует дополнительного подвода тепла и затрудняет инициирование. Для того чтобы качественно учесть влияние пленки, мы повысили температуру воспламенения

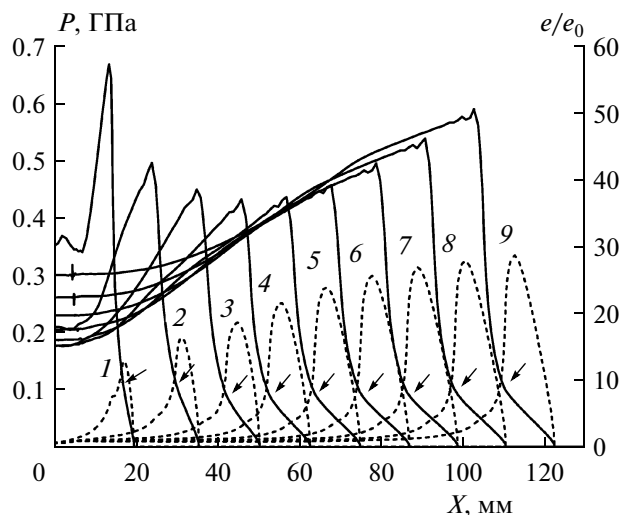


Рис. 5. Профили давления (сплошные линии) и внутренней энергии газа, отнесенной к теплоте сгорания пороха, e_0 (штриховые линии), в различные моменты времени для волны, бегущей со скоростью 1.43 км/с. Базовый вариант с $\phi_0 = 0.3$. Времена (в мкс): 16.8 (1), 25.6 (2), 33.0 (3); между профилями 4–9 по 8.1 мкс. Стрелками указано положение фронта воспламенения.

пороха, положив ее равной 900 К. Эквивалентность этой замены мы проверили, проведя расчеты с помощью модели, разработанной ранее для анализа влияния пленки полимера на конвективное горение пороха [7].

Перейдем к результатам численного моделирования. На рис. 4 даны траектории фронта волны и временные диаграммы максимального давления, рассчитанные для базового варианта при разной длительности вдува, которая качественно воспроизводит изменение толщины инициирующего слоя ВВ. Видно, что максимальное давление в волне с течением времени заметно изменяется. На стадии инициирования давление быстро нарастает до 0.7–1.5 ГПа в зависимости от длительности воздействия. Достигнув пика, максимальное давление быстро падает в волне разрежения, проходит через минимум и затем вновь начинает расти. При этом траектории фронта, если исключить участок инициирования, демонстрируют волну, бегущую с равномерной скоростью. При увеличении длительности инициирующего импульса скорость волны возрастет, составив 1.06, 1.43, 1.68 и 1.8 км/с при длительности 10, 12, 14 и 15 соответственно. При длительности инициирования выше 15 мкс волна ускоряется и переходит в режим высокой скорости.

Некоторые особенности течения представлены на рис. 5 и 6. Здесь даны серии профилей давления и внутренней энергии газа в различные моменты времени для волны, распространяющейся со скоростью 1.43 км/с, а также распределения основных характеристик течения в этой волне в

тот момент времени, когда ее фронт приблизился к концу заряда. Видно, что точка максимума давления находится на расстоянии около 20 мм от подошвы волны. Профиль внутренней энергии газа имеет пик, располагающийся примерно по середине этого участка. Амплитуда пика в десятки раз превышает теплоту сгорания пороха. На этот же участок приходится пик скорости течения газа. Воспламенение пороха также происходит до точки максимума давления. Твердая фаза только начинает вовлекаться в движение, когда скорость газа уже падает, пройдя точку максимума. Таким образом, волна сжатия твердой фазы не имеет отношения к воспламенению пороха. Порох поджигается за счет энергии, поступающей от сильно нагретого газа, движущегося в порах с высокой скоростью. Передача энергии осуществляется по газовой фазе за счет работы сжатия, которая идет на то, чтобы преодолеть сопротивление трения и поддержать высокую скорость фильтрации газа. Это и приводит к сильному разогреву газа.

Ясно, что при выбранной длине заряда (120 мм) процесс по существу охватывает лишь начальную стадию формирования зоны реакции детонационной волны. Доля сгоревшего пороха невелика и к моменту завершения стадии распространения волны по заряду не превышает 10%. Если оценить время горения порохового зерна марки ВТМ, имеющего полутолщину горящего свода 0.2 мм, то при давлении 0.5 ГПа и скорости послыоного горения, равной 0.5 м/с, время горения составит 0.4 мс. Даже для низкоскоростной детонационной волны эта величина в несколько раз превышает время, в течение которого волна пробегает всю длину заряда.

Данные по влиянию начальной пористости заряда на свойства детонационного процесса приведены на рис. 7. Видно, что чем ниже начальная пористость, тем круче идет траектория фронта, т.е. тем выше скорость волны. Расчеты проведены при пористости 0.4, 0.3, 0.25 и 0.2, расчетные значения скорости составили 1020, 1100, 1760 и 1850 м/с соответственно. Эти результаты качественно воспроизводят эффект, наблюдаемый в экспериментах. Однако расчеты при пористости 0.2 дали еще один результат: оказалось, что в этом случае, в отличие от вариантов с более высокой пористостью, в ходе развития волны течение в голове волны перестраивается. Перестройка завершается сменой механизма возбуждения химического превращения пороха. Картина течения начинает изменяться почти сразу после окончания фазы инициирования, пик в газовой фазе в голове волны "рассасывается", и вперед выходит волна сжатия, бегущая по твердой фазе, которая поджигает порох за счет диссипативного нагрева при схлопывании пор.

Картина течения во фронте волны в момент, когда она приближается к концу заряда, показана

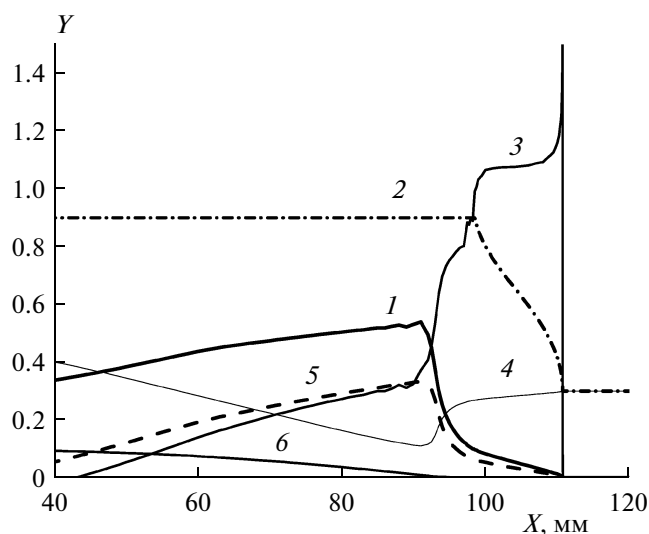


Рис. 6. Основные характеристики течения во фронте волны, имеющей скорость 1.43 км/с, в момент времени 73.3 мкс. Базовый вариант с $\phi_0 = 0.3$: 1 – давление в ГПа, 2 – температура на поверхности пор в К/1000, 3 – скорость газа в км/с, 4 – пористость, 5 – скорость твердой фазы в км/с, 6 – доля сгоревшего пороха.

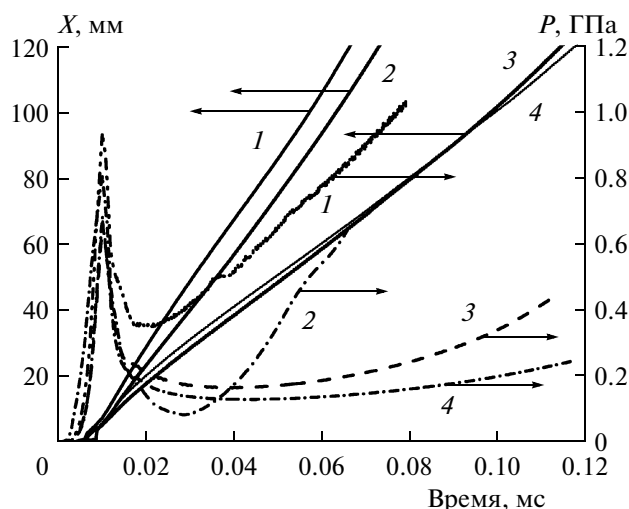


Рис. 7. Траектории фронта волны (сплошные линии) и временные диаграммы максимального давления в волне (штриховые линии) при одинаковой длительности инициирующего импульса в зависимости от пористости заряда: 0.2 (1), 0.25 (2), 0.3 (3) и 0.4 (4).

на рис. 8. Здесь в дополнение к профилю давления приведена также кривая полного давления, вычисляемого по формуле $P_{sum} = P + \sigma(1 - \phi)$. Видно, что полное давление вблизи фронта волны значительно превышает давление газа. Это означает, что энергия, идущая на поджигание пороха, передается именно по твердой фазе. Сравнивая с рис. 6, где приводится картина течения при газофазном механизме, можно отметить огромную разницу в протяженности зоны, где происходит на-

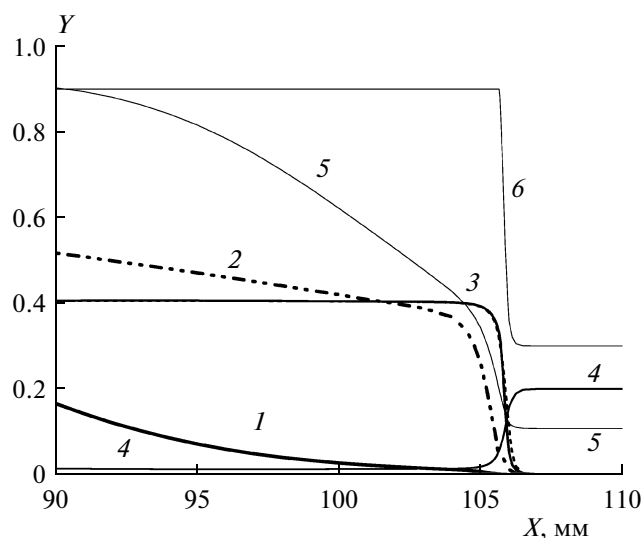


Рис. 8. Основные характеристики течения во фронте волны при твердофазном механизме (начальная пористость $\phi_0 = 0.2$, скорость волны – 1.85 км/с: 1 – давление в ГПа; 2 – полное давление в ГПа, включающее межгранулярное напряжение в твердой фазе; 3 – скорость газа и твердой фазы в км/с (кривые практически сливаются); 4 – пористость; 5 – внутренняя энергия газа, отнесенная к теплоте сгорания пороха; 6 – температура на поверхности пор в К/1000.

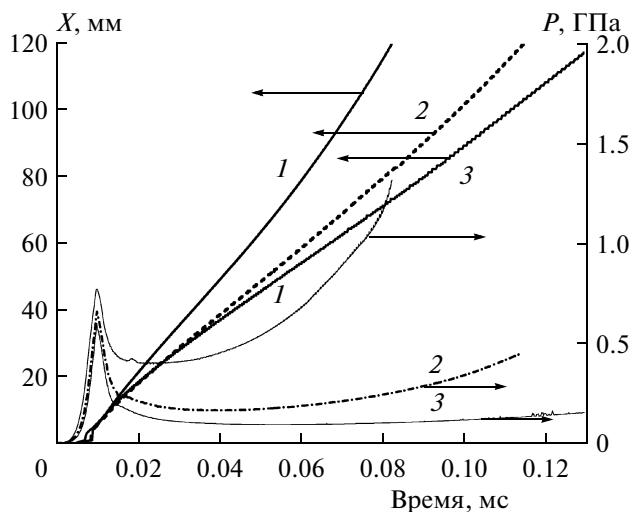


Рис. 9. Траектории фронта волны и временные диаграммы максимального давления в волне при одинаковой длительности инициирующего импульса, равной 10 мкс, в зависимости от диаметра зерен пороха в мм: 0.7 (1), 1.0 (2) и 1.7 (3).

грев поверхности зерен пороха до температуры воспламенения. При газофазном механизме размер этой зоны составляет 12.5 мм, при механизме с пластической волной – менее миллиметра.

В заключение этого раздела рассмотрим влияние размера порохового зерна на свойства процес-

са. В этой серии в дополнение к расчету для диаметра зерна в 1 мм (порох марки ВТМ) были проведены расчеты для диаметров зерен в 0.7 и 1.7 мм, что отвечает порохам марок ВУ и 4/1. Результаты расчетов приведены на рис. 9. Видно, что при прочих равных условиях уменьшение размера зерна вызывает рост скорости детонационной волны. Более того, если при размерах зерна 1.0 и 1.7 мм траектория фронта волны отвечает равномерной скорости детонации, то для зерна диаметром 0.7 мм к концу заряда фронт волны заметно ускоряется от 1.46 до 1.87 км/с. Эти результаты находятся в согласии с экспериментальными наблюдениями, приведенными в [1].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Ниже перечислены полученные в данной работе результаты, заслуживающие обсуждения.

1. *Согласие между численным моделированием и экспериментом.* Это согласие, которое наблюдается как по динамике развития волны после завершения инициирующего импульса, так и по влиянию свойств заряда на скорость волны, означает, что основные предположения модели адекватны реальным процессам, происходящим в режиме низкоскоростной детонации. Прежде всего, конечно, речь идет о тех положениях, которые касаются интенсивности химического превращения пороха. К ним относятся гипотеза, что химическое превращение в волне низкоскоростной детонации идет в режиме взрывного горения Апина [8], а также допущения, которые позволяют определить интенсивность превращения. Гипотеза взрывного горения применительно к режиму низкоскоростной детонации не имеет альтернативы из-за низкой температуры объемного разогрева. Допущения о том, что горение охватывает всю открытую поверхность зерен, а скорость регрессии пороха равна скорости послыоного горения, экстраполированной из области более низких давлений, находят известное подтверждение в практике внутриваллистических расчетов. И хотя в режиме низкоскоростной детонации пороховые зерна испытывают более интенсивные механические воздействия и горят при более высоком давлении, чем при выстреле, результаты исследования дают основания полагать, что область применения этих допущений может быть расширена.

По-видимому, в этом вопросе не последнюю роль играет механическая прочность пороховых зерен. По крайней мере, в случае кристаллических ВВ реализуется совсем иная ситуация. Так, например, в работе [6] приводятся оценки, полученные для трех ВВ: тротила, гексогена и тетрила. Согласно этим оценкам, в области низкоскоростной детонации интенсивность горения, вычисленная как произведение массовой скорости по-

слоистого горения, экстраполированной из области ракетных давлений, на площадь удельной поверхности, оказалась в 10–20 раз ниже величины, полученной путем обработки экспериментальных данных по зависимости скорости детонации от диаметра заряда. Это различие скорее всего связано с тем, что частицы ВВ легко дробятся при нагружении и поверхность частиц возрастает по сравнению с исходной величиной.

2. *Объяснение, почему скорость волны, измеряемая в режиме низкоскоростной детонации, зависит от мощности инициатора.* По результатам численного моделирования можно предложить следующую интерпретацию эффекта, наблюдаемого в опытах. Два фактора играют здесь определяющую роль: низкая интенсивность химического превращения (из-за сравнительно крупного размера порохового зерна) и ограниченная длина заряда (120 мм). Как следствие, зона реакции детонационной волны не успевает полностью сформироваться. Давление, максимальное на стадии иницирования, после завершения иницирующего импульса резко снижается, так как часть заряда, охваченная горением на этой стадии, невелика и не может противостоять действию волны разрежения. После спада максимальное давление в волне проходит точку минимума и начинает расти. Однако из-за короткой длины заряда фронт волны к этому времени достигает торца и развитие процесса прекращается. На профилях давления эволюция волны проявляется отчетливо, однако траектория фронта волны, если исключить участок иницирования, имеет практически линейную форму, которой отвечает скорость волны, близкая к постоянной величине. Если увеличить длительность иницирующего воздействия (в опытах это достигается путем увеличения толщины слоя инициатора), то давление на стадии иницирования возрастает. В результате более высокие давления реализуются также на стадии развития. Одновременно с давлением возрастает и скорость волны.

3. *Выход волны на установившийся режим.* Естественно, возникает вопрос, что будет, если длину заряда увеличить, дав возможность зоне реакции завершить свое развитие. Очевидно, что характеристики установившейся волны не должны зависеть от энергии инициатора (разумеется, в диапазоне, отвечающем низкоскоростной детонации). В рамках данной модели скорость установившейся низкоскоростной детонации определяется удельной поверхностью порохового зерна и свойствами оболочки, так как в точке Чепмена–Жуге тепловыделение за счет горения пороха уравнивается боковым расширением заряда. Пример расчетов для зарядов метровой длины при двух длительностях иницирующего импульса дан на рис. 10. Видно, что если на начальном участке две волны заметно различаются как по

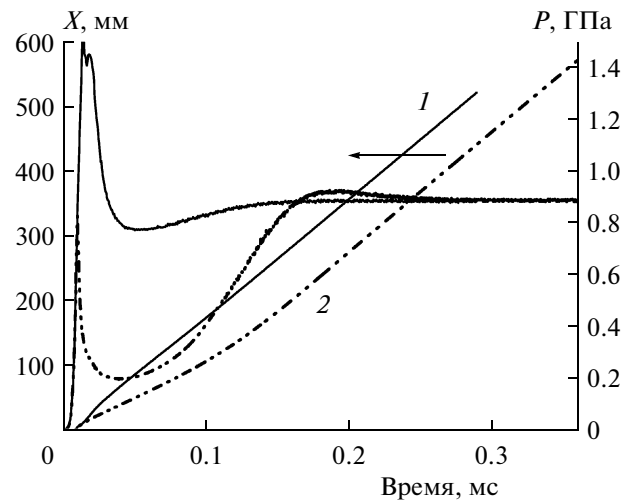


Рис. 10. Развитие низкоскоростной детонации в заряде метровой длины при $\phi_0 = 0.3$ для двух длительностей иницирующего импульса: 15 (1) и 12 мкс (2). Траектории фронта волны и диаграммы максимального давления.

скорости и максимальному давлению, так и по динамике их изменения, то, преодолев расстояние 250–300 мм, эти волны становятся практически одинаковыми, распространяясь с постоянной скоростью 1.86 км/с при максимальном давлении 0.89 ГПа.

4. *О механизмах возбуждения химического превращения пороха.* Применительно к низкоскоростной детонации пористых ВВ известны два механизма, которые в зависимости от фазы, по которой осуществляется передача энергии, расходуемой на нагрев и воспламенение пороха, можно назвать твердофазным и газофазным механизмами. Первый механизм связан с образованием горячих точек при сжатии пористого тела, обычно за счет разогрева в ходе вязкопластических деформаций [9]. Долгое время для низкоскоростной детонации пористых ВВ этот механизм считался единственным [10], пока в работе [11] не было экспериментально доказано существование другого механизма, имеющего газофазную природу, когда химическое превращение возбуждается без участия деформаций пористого материала, а только благодаря высокоскоростному потоку горячего газа, движущегося в порах. Различие было целиком отнесено на счет условий иницирования низкоскоростной детонации, так как в работе [11] и последующих статьях на эту тему [12] низкоскоростной детонационный процесс в порошке тэна иницировался либо искровым разрядом, либо газовой детонацией, что как раз и создавало вышеупомянутый высокоскоростной газовый поток.

Дальнейшие исследования показали [13, 14], что газофазный механизм возбуждения химиче-

ского превращения можно получить не только за счет условий инициирования, но и другим путем. Так, в серии работ [13, 15], посвященных переходу горения в детонацию в зарядах насыпной плотности из пироксилиновых порохов разных марок, было показано, что если зерна имеют небольшой размер, как порох марки ВТМ (зерна диаметром 1 мм), то реализуется низкоскоростная детонация по твердофазному механизму. В случае пороха марки 15/1 с зерном крупного размера (зерна диаметром 3.3 мм) реализуется другой, газофазный механизм. Особо отметим опыты по передаче детонации в заряде пороха марки 15/1 через перегородку, в которых наблюдалась смена механизма возбуждения химического превращения. Перегородка устанавливалась на середине заряда и перекрывала целиком сечение канала оболочки. Волна низкоскоростной детонации, падающая на перегородку, имела газофазную природу. За перегородкой, которая не пропускала горячие газы, но приводилась в движение натекающим потоком твердой массы за фронтом волны, с некоторой задержкой возбуждалось химическое превращение по твердофазному механизму. Однако затем течение перестраивалось, и восстанавливалась газофазная природа волны, которая имела место до перегородки.

Эти данные позволяют предположить, что помимо условий инициирования реализация того или иного механизма зависит также от скоростей распространения возмущений по газовой и твердой фазам пористого тела. Результаты численного моделирования, полученные в нашей работе, дают новые основания для обсуждения проблемы. Взрывное инициирование малой мощности, которое изучалось в данном исследовании, воздействует на исследуемый заряд подобно инициированию газовой детонацией, генерируя высокоскоростной поток горячих газов, но при существенно более высоком давлении. Расчеты, проведенные применительно к зарядам из пороха марки ВТМ с разной начальной пористостью, показали, что при взрывном инициировании за счет высокоскоростных струй, втекающих в поры, возбуждается низкоскоростная детонация с газофазным механизмом. После окончания инициирующего импульса при начальной пористости $\phi_0 = 0.4-0.25$ газофазный механизм сохраняется на стадии развития волны вплоть до выхода на установившийся ре-

жим низкоскоростной детонации. Однако при $\phi_0 = 0.2$, сразу после завершения инициирующего воздействия, течение в голове волны перестраивается, высокоскоростной газовый поток рассасывается, вперед выходит волна сжатия пористого тела, и происходит смена газофазного механизма на твердофазный.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-03-00294).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ken O., Tomohary M., Yosio N. et al. // J. Jpn. Explosives Soc. 2002. V. 63. № 3. P. 128.
2. Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Чеканов С.В. и др. // Хим. физика. 1992. Т. 11. № 2. С. 293.
3. Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Сукоян М.К. // Фундаментальные проблемы физики ударных волн. Т. 1. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1987. Ч. 1. С. 46.
4. Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Сулимов А.А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 1. С. 62.
5. Физика взрыва / Под ред. Орленко Л.П. М.: Физматлит, 2002.
6. Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.-N. // Proc. Europryo 2007. 34th IPS. V. 1. France, 2007. P. 323.
7. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Беляев А.А., Романьков А.В., Посвянский В.С. // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 1. С. 84.
8. Апин А.Я. // Докл. АН СССР. 1945. Т. 50. С. 285.
9. Хасаинов Б.А., Борисов А.А., Ермолаев Б.С. // Хим. физика. 1988. Т. 7. № 7. С. 989.
10. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв М.: Наука, 1973.
11. Андреев В.В., Лукьянчиков Л.А. // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10. № 6. С. 912.
12. Григорьев В.В., Лукьянчиков Л.А., Пруэлл Э.Р., Васильев А.А. // Там же. 2001. Т. 37. № 5. С. 90.
13. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Окунев В.А., Хасаинов Б.А. // Фундаментальные проблемы физики ударных волн. Т. 1. Черноголовка: ОИХФ РАН, 1987. Ч. 1. С. 40.
14. Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Чеканов С.В. и др. // Хим. физика. 1992. Т. 11. № 7. С. 977.
15. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С., Коротков А.И. и др. // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 6. С. 9.