

## УДАРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАЧАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ОБЗОР)

П. А. Уртьев, К. М. Тарвер

Центр энергетических материалов Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса  
94551 Ливермор, Калифорния, США, urtiew1@llnl.gov

Ударно-волновое инициирование — одно из важнейших свойств энергетических материалов, которые должны детонировать точно, как предполагается, при преднамеренном ударном нагружении и не должны детонировать при случайном ударном нагружении. Развитие техники манганиновых датчиков, помещенных внутри заряда взрывчатого вещества и регистрирующих рост давления под действием ударного импульса, значительно расширило информацию о таких реагирующих потоках. Эти экспериментальные данные вместе с аналогичными записями электромагнитных датчиков массовой скорости дали нам возможность сформулировать модель ударно-волнового инициирования «Ignition and Growth» и детонации в гидродинамических компьютерных кодах для предсказания тех сценариев ударного инициирования, которые нельзя проверить экспериментально. Важная проблема при ударном инициировании — это изменение чувствительности твердых взрывчатых веществ при их нагревании (или охлаждении). Представлены экспериментальные записи давления, полученные при помощи манганиновых датчиков, и соответствующие расчеты по модели «Ignition and Growth» для двух твердых взрывчатых веществ — LX-17 (массовое содержание — 92.5 % триаминотринитробензола и 7.5 % связующего Kel-F) и LX-04 (85 % октагидро-1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетразина (октогена) и 15 % связующего Viton) при различных начальных температурах.

Ключевые слова: детонация, ударное инициирование при различных температурах, энергетические материалы, пластические ВВ, моделирование инициирования, LX-04, LX-17.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергетические материалы (ЭМ) широко используются как в промышленных приложениях, так и в военном деле. Иницирование таких материалов вызывает особенный интерес как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения управления эффектом от их применения. Энергетические материалы существуют в газовом состоянии, а также в конденсированной фазе, в гомогенной форме, как, например, жидкости и пасты, или в гетерогенной форме, как, например, твердые композиции, состоящие из гранулированных смесей энергетических материалов с энергетическими или инертными связующими.

Существуют различные способы инициирования энергетических материалов. Газовые смеси, такие как водород и кислород, легко инициируются искрой, нагревающим элемен-

том или открытым пламенем. Конденсированные ЭМ могут инициироваться механически, или тепловым нагревом, или же каким-либо способом динамического нагружения, например, ударным. Из всех механизмов инициирования опыты с ударным нагружением дают возможность провести наилучший количественный анализ, поскольку при этом можно измерять не только давление и температуру материала, но и точное время воздействия этих величин. Важным параметром является и начальная температура, при которой происходит динамическое нагружение, потому что при более высокой температуре возрастает способность материала к химическому разложению, что, в свою очередь, повышает чувствительность к ударному воздействию.

Основной акцент в данной работе сделан на исследовании ударного инициирования энергетических материалов (главным образом, твердых гетерогенных) при различных начальных температурах, чтобы получить необходимую оценку чувствительности материала к динамическому нагружению.

P. A. Urtiev, G. M. Tarver  
Energetic Materials Center, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551 USA.

Данная работа выполнена при поддержке Департамента энергии США Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса (контракт W-7405-ENG-48).

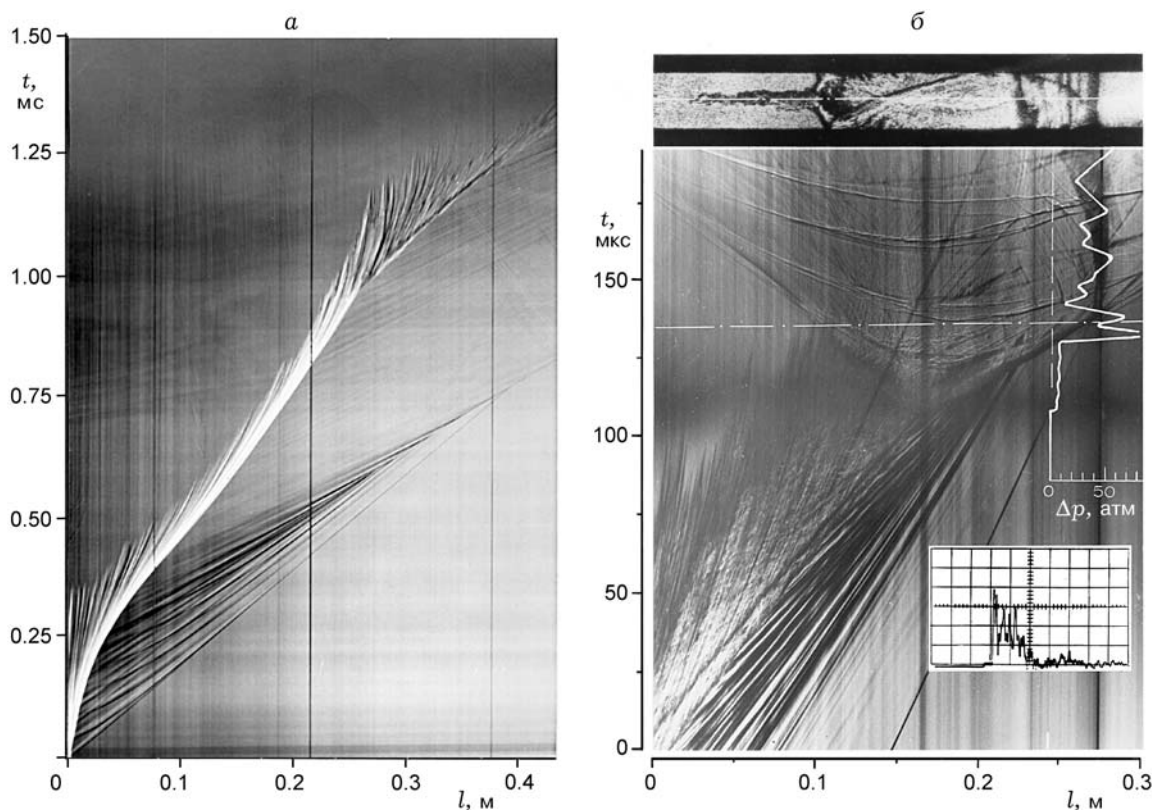


Рис. 1. Фоторегистрограммы в газе:

*a* — инициирование, *б* — возникновение детонации в стехиометрической смеси водород — кислород, находящейся первоначально при низком давлении

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Иницирование газовых смесей и возможный переход к детонации в них широко исследовались с начала 40-х и вплоть до конца 60-х годов прошлого века. Подробный обзор этих исследований сделан в [1], где приведена обширная библиография по данной теме. Особый интерес здесь представляет механизм, провоцирующий инициирование после ударного нагружения, а также механизм перехода к детонации. При динамическом нагружении газовая смесь через характерное для нее время индукции воспламеняется и горит, усиливая выделяющейся энергией начальную ударную волну (УВ). Пламя, которое вначале может быть ламинарным, становится турбулентным, площадь его поверхности увеличивается, что в дальнейшем приводит к усилению УВ. В конце концов этот процесс переходит в такое состояние, когда характерное время индукции, соответствующее давлению и температуре позади усилившейся УВ, становится столь малым, что

малейший дополнительный выброс, например, взрыв небольшого объема несгоревшей смеси в турбулентном пламени, может возбудить сильную детонационную волну позади начальной УВ. Эта пересжатая волна обгоняет первоначальную УВ и распространяется по несгоревшей смеси, затухая и переходя к самоподдерживающейся детонационной волне, характерной для данной смеси. Рис. 1 иллюстрирует описанный процесс.

В дополнение к фоторазвертке (на плоскости время — расстояние) на рис. 1, *б* показана шпирен-фотография, сделанная через прозрачное стеклянное окно в прямоугольной детонационной трубе в момент времени 132 мкс, отмеченный горизонтальной штрихпунктирной линией на рисунке. Импульс давления на фоторазвертке (он приведен к временному масштабу фоторазвертки) — это масштабированная репродукция действительного импульса, изображенного ниже на рис. 1, *б*. Положение датчика давления показано вертикальной штриховой линией.

Поведение гомогенных жидких энергетических материалов очень похоже на поведение газовых смесей, за исключением того, что для инициирования реакции в них необходима намного более сильная УВ, а характерное время индукции может быть значительно меньше. Инициирование гомогенных жидких ЭМ рассмотрено в обзоре [2], в котором цитируются наиболее значимые работы в этой области.

Инициирование твердых гетерогенных материалов происходит у самого ударного фронта, ускоряя его вплоть до точки перехода к детонации. Механизм, который приводит к возникновению реакции вблизи волнового фронта, связан с формированием «горячих точек», возникающих из-за наличия пор и поверхностей раздела между гранулами материала [3]. Горячие точки способствуют развитию реакции в своей окрестности, увеличивая тем самым площадь поверхности горения, в результате чего за УВ образуется волна сжатия. Последняя обгоняет лидирующий ударный фронт и вызывает быстрый рост ударного давления, что приводит к формированию детонационной волны. Этот процесс перехода к детонации детально описан в следующих параграфах.

## ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Большинство экспериментов с твердыми гетерогенными материалами проведены в нашей лаборатории на газовой пушке с твердым топливом, калибром 100 мм. Установка позволяла точно контролировать скорость ударника и нагружающее давление на мишени из ЭМ. Постановка экспериментов показана на рис. 2.

Мишень состояла из нескольких дисков взрывчатого вещества (ВВ) различной толщины. Между дисками помещались манганиновые датчики. С каждой стороны датчики изолировались тефлоновой пленкой (толщиной 125 мкм), чтобы предотвратить их закорачивание проводящей средой, когда материал начнет реагировать. Подробнее устройство манганиновых датчиков давления описано в наших работах [4–9]. Для того чтобы точнее контролировать ударное давление, на поверхность сборки помещался тонкий экран из того же материала, что и ударник. Поэтому соударение было симметричным.

Кроме того, по периферии мишени на уровне с поверхностью соударения монтировалось шесть контактных («пин») датчиков для регистрации наклона ударника перед ударом, а

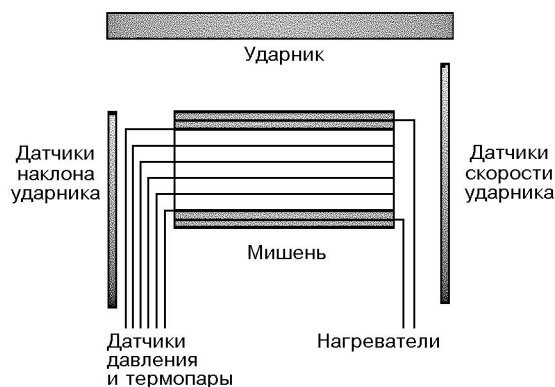


Рис. 2. Экспериментальная установка, использованная для исследования процесса инициирования в твердых гетерогенных ВВ:

показан момент, когда снаряд с ударником вылетает из ствола пушки перед ударом по мишени; в мишени на различной глубине расположены манганиновые датчики давления и термопары, а также пин-датчики для измерения скорости и наклона ударника перед соударением

также два пин-датчика, выдвинутых из мишени на определенное расстояние для измерения скорости ударника при его подлете к мишени.

При проведении экспериментов с нагревом мишеней с каждой стороны сборки помещались спиральные нагреватели из тонкой нихромовой фольги, отделенные от сборки тонким металлическим диском, чтобы улучшить распределение тепла по исследуемому материалу. В этом случае в измерительные пакеты с датчиками вводились термопары для регистрации распределения температуры в мишени во время нагрева. Скорость нагрева мишени обычно была постоянной: сначала  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , до тех пор пока температура не становилась примерно на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже желаемой, затем  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , до тех пор пока не достигалась необходимая температура, которая поддерживалась все время, вплоть до выстрела пушки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАПИСИ

Ниже представлены записи, полученные при проведении экспериментов по инициированию гетерогенных мощных ВВ. На рис. 3, 4 показаны профили давления при ударном нагружении малочувствительного ВВ на основе триаминотринитробензола (ТАТБ) — LX-17 (92.5 % ТАТБ и 7.5 % связующего Kel-F, здесь и везде далее указано массовое содержание), спрессованного до 98.5 % от теоретически

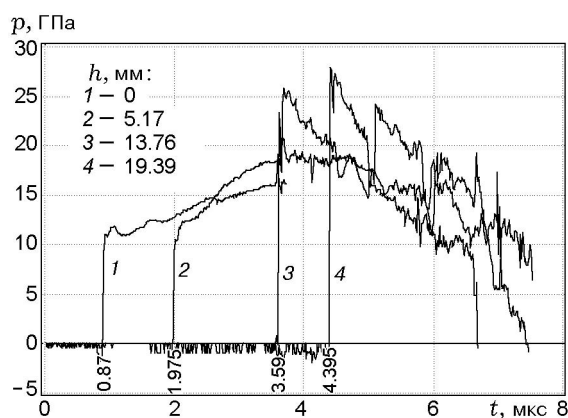


Рис. 3. Профили давления в LX-17 при комнатной температуре (алюминиевый ударник со скоростью 1.88 км/с)

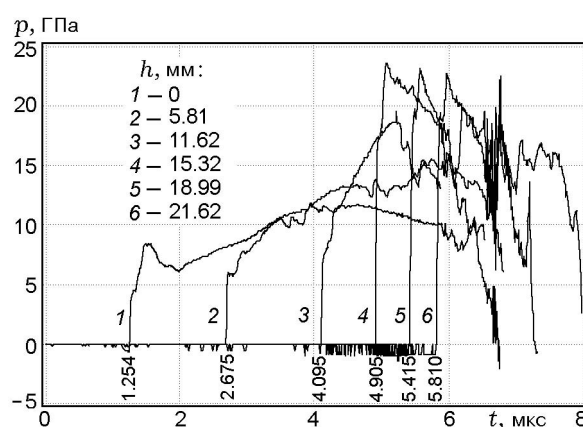


Рис. 5. Профили давления в LX-17, нагретом до 250°C, находящемся в оболочке из нержавеющей стали (ударник из нержавеющей стали 304 со скоростью 1.16 км/с)

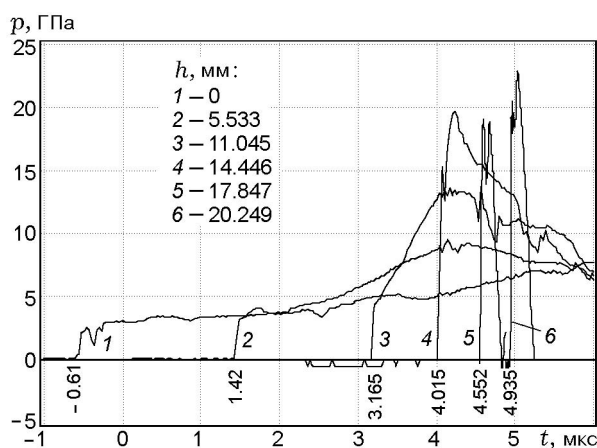


Рис. 4. Профили давления в LX-17, нагретом до 250°C (алюминиевый ударник со скоростью 0.81 км/с)

максимальной плотности и имеющего первоначально комнатную температуру и  $T = 250^\circ\text{C}$ .

Взрывчатое вещество LX-17 при комнатной температуре нагружалось алюминиевым ударником со скоростью 1.88 мм/мкс, который создавал в материале мишени давление  $p = 11.0$  ГПа (см. рис. 3). Явно видны две особенности инициирования гетерогенного ВВ: незначительная реакция возникает сразу за ударным скачком, вызывая рост давления, а основная реакция происходит достаточно далеко от лидирующего скачка, образуя волну сжатия, которая обгоняет фронт и приводит к окончательному переходу к детонации. В данном случае переход к детонации произошел непосредственно перед третьим датчиком на глубине

$h \approx 11.4$  мм.

Если мишень предварительно нагрета до более высокой температуры, то ее материал становится чувствительнее и для того, чтобы переход к детонации произошел примерно на том же расстоянии от поверхности соударения, требуется намного меньшая динамическая нагрузка. Как раз такой случай показан на рис. 4: мишень нагрета до  $250^\circ\text{C}$  и затем нагружена ударной волной с амплитудой 3 ГПа. Переход к детонации произошел в мишени примерно на той же глубине  $h \approx 11$  мм, что и на рис. 3. Давление в УВ монотонно нарастало, что свидетельствует о протекании некоторой реакции вблизи ударного фронта. Причина, по которой нагретый материал становится более чувствительным к ударному нагружению, заключается в тепловом расширении материала, приводящем к уменьшению плотности и возникновению в нем большего числа пор и, следовательно, большего числа горячих точек для инициирования реакции и быстрого роста их в окружающее, предварительно нагретое ВВ.

Если поместить реакционноспособный материал в оболочку из нержавеющей стали, то можно несколько ограничить тепловое расширение и снизить ударную чувствительность. На рис. 5 показаны профили давления, полученные в эксперименте, в котором мишень из LX-17 была помещена в стальную оболочку и нагрета также до температуры  $250^\circ\text{C}$ . При ударном давлении 8.0 ГПа переход к детонации произошел в мишени на глубине  $h \approx$

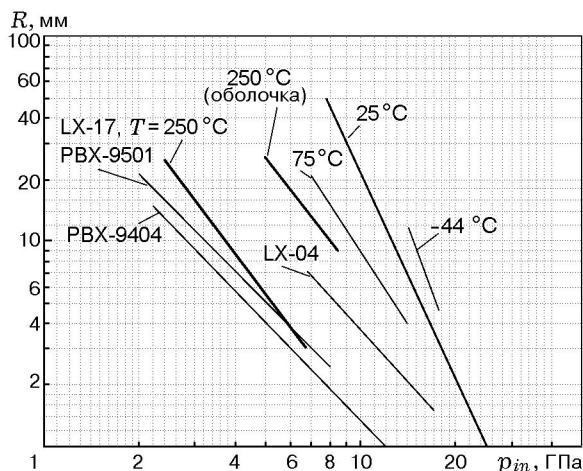


Рис. 6. «Pop plot» для LX-17 при различных начальных температурах (все заряды без оболочки, кроме одного)

14 мм. Ударная чувствительность LX-17 при различных начальных температурах представлена на рис. 6 в виде так называемого «Pop plot» — графика, который показывает зависимость расстояния до возникновения детонации от начального ударного давления. Этот рисунок позволяет сопоставить чувствительность LX-17 при различных температурах и при наличии оболочки и без нее с более чувствительными ВВ на основе октогена: PBX-9404 (94 % октогена, 3 % нитроцеллюлозы, 3 % CEF) и PBX-9501 (95 % октогена, 2.5 % Estane, 2.5 % BDNPA-F) при нормальных условиях. В логарифмических координатах большинство из этих зависимостей выглядят прямыми линиями. Чем ближе линия расположена к началу графика, тем чувствительнее материал.

Подобные эксперименты проведены еще с одним более чувствительным ВВ на основе октогена — LX-04 (85 % октогена и 15 % связующего Viton) при комнатной температуре и при  $T = 150$  и  $170$  °C (рис. 7–9). Во всех экспериментах сначала наблюдалась УВ постоянной амплитуды, а затем, по мере развития реакции в ВВ, — сильный рост давления, непосредственно перед переходом к детонации. Опять-таки, если LX-04 помещали в тяжелую оболочку из нержавеющей стали, то переход к детонации подавлялся и его чувствительность была несколько ниже чувствительности нагретого LX-04 без оболочки, но все еще выше, чем чувствительность LX-04 при нормальных условиях.

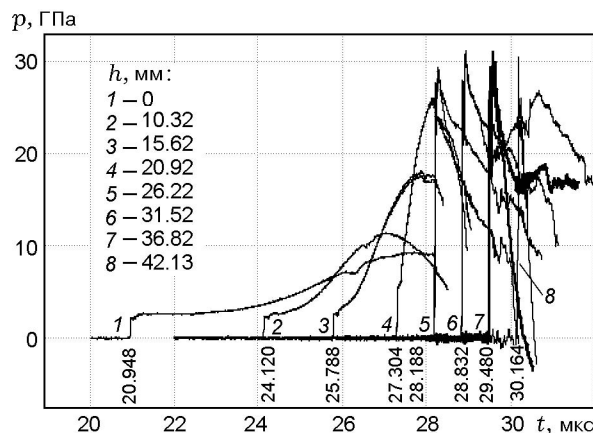


Рис. 7. Профили давления в LX-04 при нормальных условиях (нагружение стальным ударником со скоростью 0.509 км/с через тефлоновый экран)

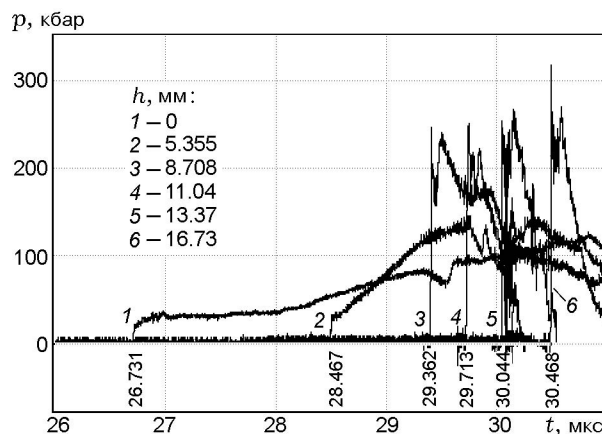


Рис. 8. Профили давления в LX-04, нагретом до 150 °C (алюминиевый ударник со скоростью 0.701 км/с)

При нагреве ВВ до еще более высокой температуры ( $T = 190$  °C), при которой образец выдерживался некоторое время, в октогене происходил переход из первоначальной  $\beta$ -кристаллической модификации в  $\delta$ -кристаллическую. Фазовый переход четко виден на профилях температуры, зарегистрированных термодатчиками, размещенными внутри измерительных пакетов вместе с датчиками давления (рис. 10). Фазовый переход начинается при  $T \approx 177$  °C и длится более 20 мин. К сожалению, из-за жестких условий проведения экспериментов (высокие температура и давление, при которых находятся датчики) записи давления сильно искажены шумами и поэтому не представлены

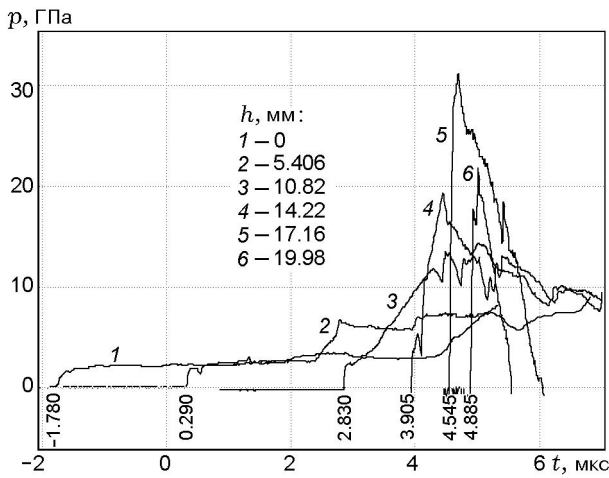


Рис. 9. Профили давления в LX-04, нагретом до 170 °С (алюминиевый ударник со скоростью 0.515 км/с)

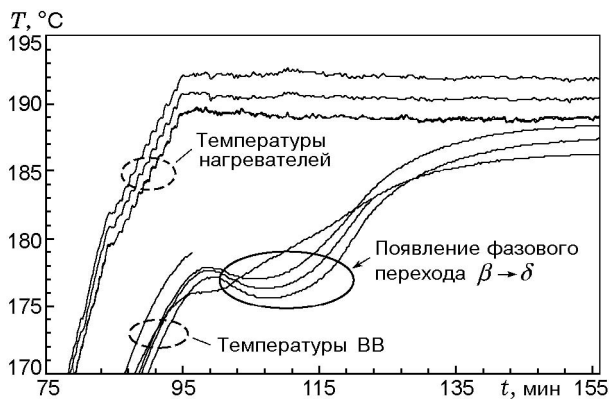


Рис. 10. Профили температуры на различной глубине в мишени во время нагрева до заданной температуры 190 °С:

отчетливо виден переход β-модификации октогена в δ-модификацию, происходящий при температуре выше 175 °С

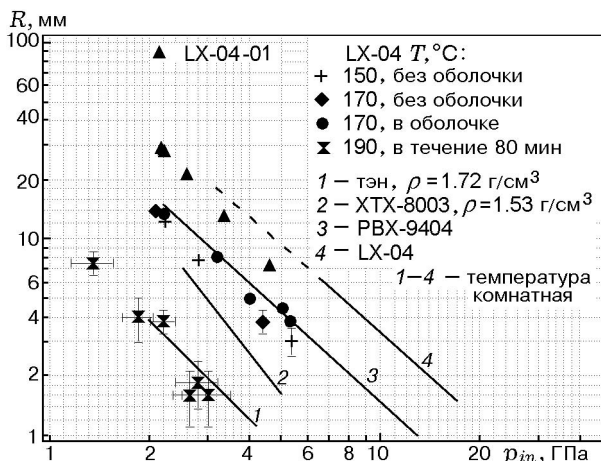


Рис. 11. «Pop plot» для LX-04 при различных начальных температурах

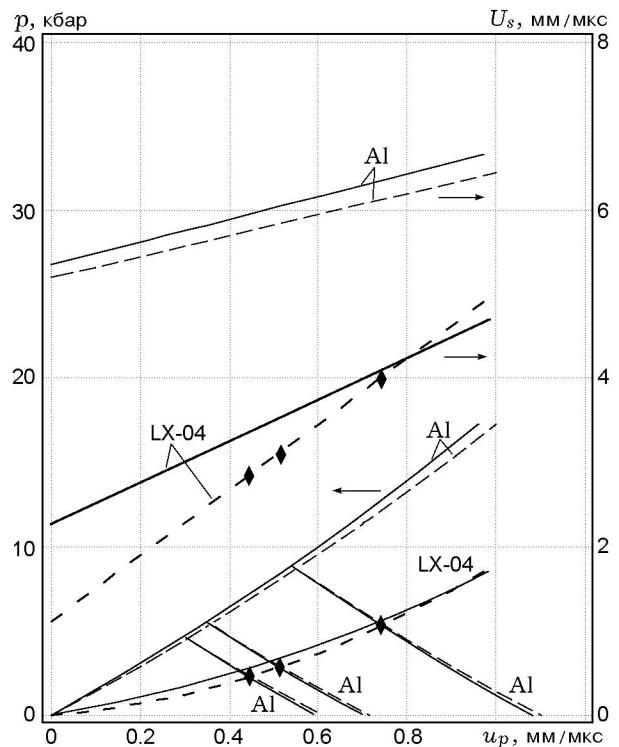


Рис. 12. Построение зависимости  $U_s-u_p$  на основе анализа экспериментальных данных для LX-04, нагретого до 150 °С:

сплошные линии — ударные адиабаты алюминия и LX-04 при нормальных условиях, штриховые — при  $T = 150$  °С, значки — эксперимент

здесь. Тем не менее для каждого эксперимента информация была восстановлена из этих записей при отдельной обработке каждого профиля. Относительная ударная чувствительность LX-04 при различных начальных температурах представлена на рис. 11, где также приведены данные для ХТХ-8003 (80 % тэна, 20 % силиконовой резины) и РВХ-9404.

### АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Любые нагретые материалы, и в особенности те, которые способны к химической реакции, испытывают значительные изменения плотности и ведут себя по-разному при различных начальных температурах. Поэтому для каждого из них необходимо найти новое уравнение состояния в форме соотношения «ударная скорость — массовая скорость» ( $U_s-u_p$ ). Этот анализ проведен с использованием известного метода согласования импедансов, и его результаты представлены на рис. 12 для LX-04, нагретого до 150 °С.

Предполагая, что уравнение состояния

Плотность и константы в соотношении  $U_s-u_p$  для LX-04 и LX-17 при различной начальной температуре ( $U_s = c + s u_p$ )

ВВ	$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$c, \text{км/с}$	$s$
LX-17	25	1.89	1.67	2.86
LX-17	250	1.696	1.26	2.5
LX-04	25	1.85	2.28	2.45
LX-04	150	1.784	1.12	3.9
LX-04	170	1.774	1.0	3.36
LX-04	190	1.633	1.15	1.6

ударника при комнатной температуре известно, можно построить его адиабату с началом в точке, соответствующей скорости ударника. Измерение начального давления в нескольких опытах даст на плоскости  $p-u_p$  адиабату нагретого материала мишени. Экспериментальные записи дают также начальные ударные скорости. Зная ударные и массовые скорости, можно нанести новые точки на плоскость  $U_s-u_p$ . При наличии трех и более экспериментальных точек по ним можно построить корректное соотношение  $U_s-u_p$ .

Для экспериментов с нагревом необходимо также знать плотность нагретого материала экрана и его соотношение  $U_s-u_p$ , чтобы использовать фактическую скорость ударника. Обычно ударник и экран изготавливаются из одного и того же материала, чтобы соударение было симметричным. Коэффициенты температурного расширения этих материалов хорошо известны и очень малы. Тем не менее они оказывают некоторое влияние на результаты анализа. Полученные значения плотности и константы в соотношении  $U_s-u_p$  для LX-17 и LX-04 представлены в таблице.

### МОДЕЛЬ РЕАГИРУЮЩЕГО ПОТОКА «IGNITION AND GROWTH»

Поскольку не все сценарии ударного инициирования можно проверить экспериментально, для прогнозирования результатов таких сценариев разработана математическая модель ударного инициирования, реализованная в гидродинамических кодах. Модель построена на основе обсуждавшихся выше экспериментов. Все модели реагирующих потоков требуют, как минимум, два уравнения состояния (для непрореагировавшего ВВ и для продуктов ре-

акции), уравнение скорости разложения ВВ и правило смесей для расчета состояния частично прореагировавшей смеси, в которой присутствуют и ВВ, и продукты реакции. Модель реагирующего потока «Ignition and Growth» [10] использует два уравнения состояния Джонса — Уилкинса — Ли (JWL): одно — для непрореагировавшего ВВ, второе — для продуктов реакции в форме зависимости от температуры

$$p = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + \omega c_v T / V, \quad (1)$$

где  $p$  — давление, Мбар,  $V$  — удельный объем,  $T$  — температура,  $\omega$  — коэффициент Грюнайзена,  $c_v$  — средняя теплоемкость,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$  и  $R_2$  — константы. Уравнение состояния непрореагировавшего ВВ согласовано с имеющимися данными по ударной сжимаемости, а уравнение состояния продуктов детонации — с данными «теста цилиндра» и другими данными по ускорению металлов. При высоких давлениях, существующих при ударном инициировании и детонации твердых и жидких ВВ, давление обеих фаз должно выравниваться, так как взаимодействие между горячими газами и молекулами ВВ происходит в наносекундном диапазоне времени и зависит от скорости звука в компонентах. Относительно температуры взрывчатой смеси делались различные предположения, потому что передача тепла между горячими продуктами и более холодным ВВ идет медленнее, чем процесс выравнивания давления. В модели «Ignition and Growth» температуры непрореагировавшего ВВ и продуктов детонации полагаются одинаковыми. Принцип температурного равновесия используется потому, что перенос тепла быстро возрастает по мере того, как реагирующие горячие точки растут и охватывают все больше частиц ВВ при высоких давлениях и температурах, соответствующих детонации. При всех расчетах реагирующих потоков расчетная сетка должна быть настолько мелкой, чтобы результаты не изменялись при переходе к более мелкой сетке. Обычно это требует разрешения, по меньшей мере, 10 ячеек/мм в зоне детонации. Экспериментально определенная длина зоны реакции у малочувствительного ВВ LX-17 примерно 3 мм, поэтому при разрешении 10 ячеек/мм зона реакции охватывает 30 ячеек. Ударное инициирование происходит на больших дистанциях, чем ширина зоны реакции при детонации, поэтому использование разрешения 10 ячеек/мм приводит к тому, что результаты

расчета ударного инициирования сходятся.

Скорость реакции в модели «Ignition and Growth» задается следующим уравнением:

$$\frac{dF}{dt} = I(1 - F) \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1 - F)^c F^d p^y + G_2(1 - F)^e F^g p^z, \quad (2)$$

$$0 < F < F_{ig,max}, \quad 0 < F < F_{G_1,max},$$

$$F_{G_2,min} < F < 1,$$

где  $F$  — доля прореагировавшего ВВ;  $t$  — время, мкс;  $\rho$  — текущая плотность, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_0$  — начальная плотность;  $p$  — давление, Мбар;  $I$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $g$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $F_{ig,max}$ ,  $F_{G_1,max}$ ,  $F_{G_2,min}$  — константы. Это трехчленное уравнение скорости реакции отображает три стадии реакции, обычно наблюдаемые при ударном инициировании и детонации прессованных твердых ВВ [10]. Первая стадия реакции — образование и воспламенение горячих точек, вызванное различными механизмами (схлопывание пор, вязкое течение, трение, сдвиг и т. д.), когда начальная УВ или волна сжатия взаимодействуют с молекулами непрореагировавшего ВВ. Обычно доля твердого ВВ, нагретого во время ударного сжатия, примерно равна первоначальному объему пор. При ударном инициировании второй член в уравнении (2) описывает относительно медленный рост внутри и/или наружу отдельных горячих точек в дефлаграционном процессе. Третий член соответствует быстрому завершению реакции, представляемому как объединение горячих точек при высоких давлениях и температурах с последующим переходом от ударно-индуцированной реакции к детонации.

При моделировании детонации первый член уравнения (2) описывает реакцию количества ВВ, несколько меньшего или равного объему пор после сжатия ВВ до состояния, соответствующего непрореагировавшему ВВ в химике. Второй член в уравнении (2) моделирует быстрое разложение твердого ВВ в стабильные газовые продукты детонации (СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О, N<sub>2</sub>, СО и т. д.). Третий член описывает относительно медленный процесс образования твердого углерода (аморфного, алмаза или графита), ограниченный диффузией, пока не достигается химическое и термодинамическое равновесие в состоянии Чепмена — Жуге. Эти ста-

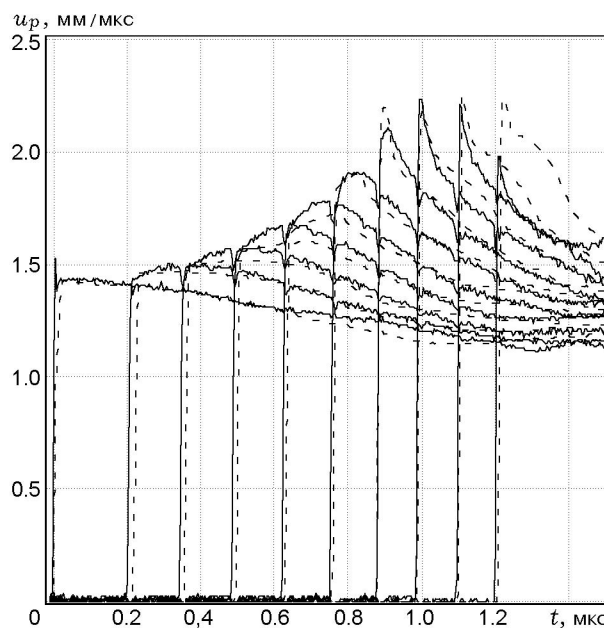


Рис. 13. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) профили массовой скорости для LX-17 в нормальных условиях (ударник из Kel-F со скоростью 2.951 км/с)

дии зоны реакции регистрировались экспериментально датчиками массовой скорости и давления и при помощи лазерной интерферометрии [11–13].

Модель «Ignition and Growth» применялась при моделировании большого числа экспериментов по ударному инициированию и детонации с использованием различных одно-, двух- и трехмерных гидродинамических кодов. В постановках по ударному инициированию модель корректно описывает следующие параметры и процессы: профили, регистрируемые датчиками в ВВ, расстояние до детонации, инициирование коротким ударным импульсом, воздействие последовательными УВ, отраженную УВ, квазиизоэнтропическое сжатие (ramp wave compression) и эксперименты с расходящимися потоками на нескольких мощных ВВ при различных начальных температурах (нагрев и ударное нагружение), плотностях и степенях разрушения (удар и последующее ударное нагружение) [14–18].

Как уже отмечалось в параграфе «Экспериментальные записи», для взрывчатого вещества LX-17 ударная чувствительность зарядов без оболочки сильно возрастает при нагреве от 25 до 250 °С, но этот рост может быть частич-



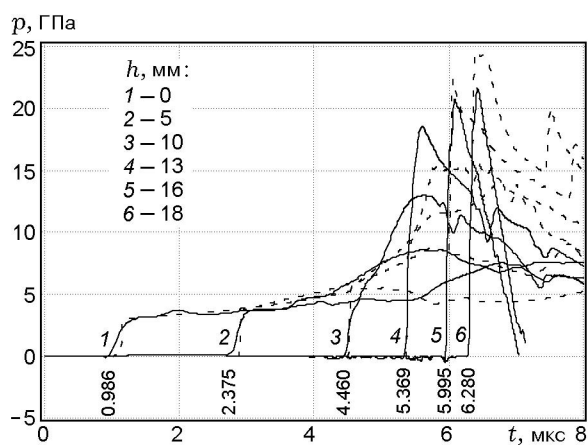


Рис. 14. Экспериментальные (сложные линии) и расчетные (штриховые) профили давления в LX-17 без оболочки, нагретом до 250 °С (алюминиевый ударник со скоростью 0.836 км/с)

но подавлен при использовании тяжелой стальной оболочки. В дополнение к манганиновым датчикам, которые обсуждались выше, разработаны датчики массовой скорости, размещавшиеся в ВВ и регистрировавшие процесс ударного инициирования в гетерогенных твердых ВВ [5, 15]. На рис. 13 показаны экспериментальные и расчетные профили массовой скорости при ударном инициировании LX-17, находившегося при нормальных условиях. Иницирование проводилось пластиной из Kel-F, лежащей со скоростью 2.951 км/с [15]. Каждый последующий датчик массовой скорости размещался на 0.85 мм глубже предыдущего. Начальное давление (14.96 ГПа) возрастало на каждом датчике, но основной рост реакции происходил за фронтом УВ. Когда волна сжатия обгоняла начальный ударный фронт, происходил переход к детонации, и это видно из последних четырех профилей на рис. 13. Для расчета процесса инициирования, который регистрировался датчиками массовой скорости, использованы параметры модели «Ignition and Growth», калиброванные по данным измерений с датчиками давления. Следовательно, измерения датчиками давления и датчиками массовой скорости, размещенными в ВВ, дают эквивалентные результаты по ударному инициированию.

На рис. 14 и 15 показаны профили давления при ударе алюминиевым ударником (со скоростями 0.836 и 1.11 км/с) по заряду LX-17, нагретому до 250 °С, без оболочки [7] и в

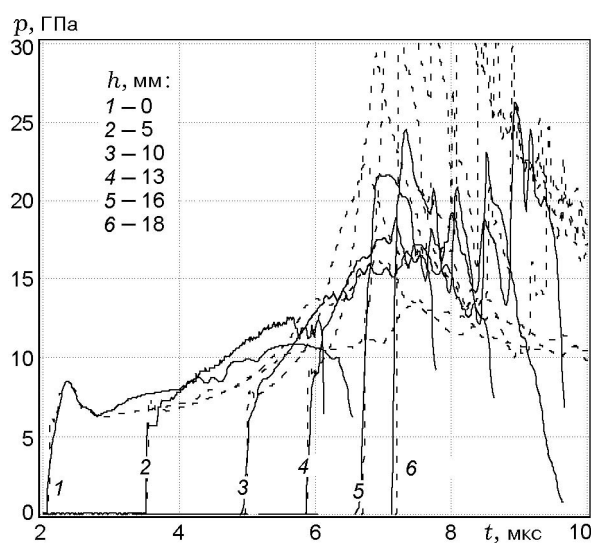


Рис. 15. Экспериментальные (сложные линии) и расчетные (штриховые) профили давления в LX-17 в стальной оболочке, нагретом до 250 °С (стальной ударник со скоростью 1.11 км/с)

стальной оболочке [9]. Повышенная чувствительность LX-17 без оболочки получена при использовании в расчетах меньшей начальной плотности (из-за большого термического расширения LX-17) и большего значения первого члена в уравнении для скорости реакции (2), а также при большем коэффициенте развития реакции  $G_1$  во втором члене уравнения (2). Поскольку тяжелая стальная оболочка препятствует увеличению объема LX-17 при нагреве до 250 °С, то при моделировании поведения зарядов LX-17 в оболочках использовали большую плотность наряду с тем же значением коэффициента  $G_1$ , что и для нагретых зарядов без оболочки. Проведены также эксперименты с манганиновыми датчиками, помещенными в заряды из чистого сверхвысокодисперсного ТАТБ при  $T = 250$  °С, и моделирование этих экспериментов [16].

Датчики давления и модель «Ignition and Growth» применяли также для изучения ударного нагружения предварительно нагретых образцов на основе более чувствительного ВВ — октогена. На рис. 16 представлены экспериментальные и расчетные профили давления в LX-04, нагретом до 190 °С, при ударе алюминиевым ударником со скоростью 0.92 км/с [17]. Температуры 190 °С достаточно для того, чтобы перед нагружением вызвать переход из  $\beta$ -кристаллической модификации окто-

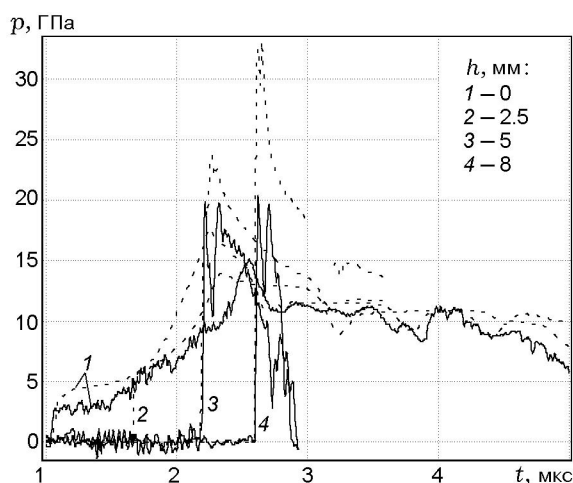


Рис. 16. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) профили давления в LX-04, нагретом до 190 °С (алюминиевый ударник со скоростью 0.92 км/с)

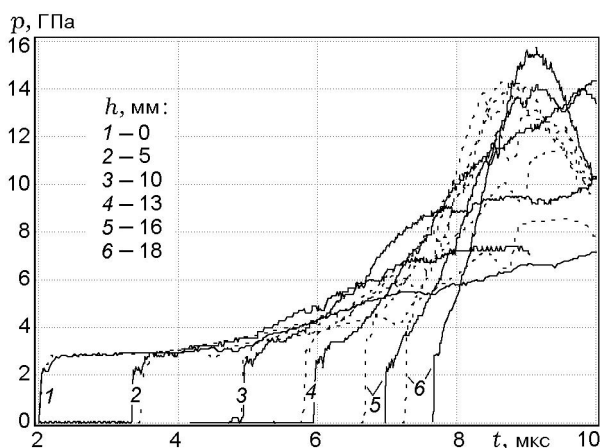


Рис. 17. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) профили давления в LX-04 при нормальных условиях (25 °С) (тефлонный ударник со скоростью 0.956 км/с)

гена в  $\delta$ -кристаллическую. LX-04, содержащий  $\delta$ -октоген, более чувствителен, чем LX-04, содержащий  $\beta$ -октоген, при  $T = 25, 150$  и  $170$  °С [18]. Профили давления и результаты моделирования ударного инициирования LX-04 при  $T = 25$  [8, 9],  $150$  [18] и  $170$  °С [8, 9] показаны на рис. 17–19 соответственно. Близкое соответствие профилей, полученных при  $T = 150$  и  $170$  °С, означает, что переход  $\beta$ -фазы в  $\delta$ -фазу не произошел за то время, которое заряд выдерживался при  $T = 170$  °С перед проведением эксперимента. Коэффициент реакции  $G_1$  в

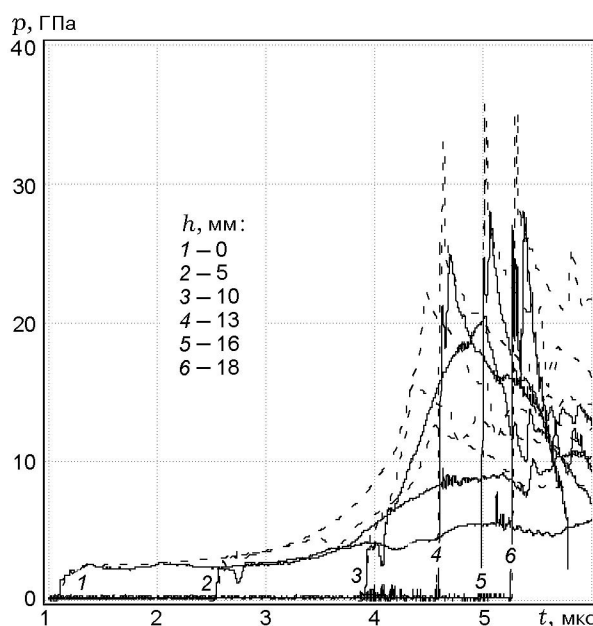


Рис. 18. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) профили давления в LX-04, нагретом до 150 °С (алюминиевый ударник со скоростью 0.594 км/с)

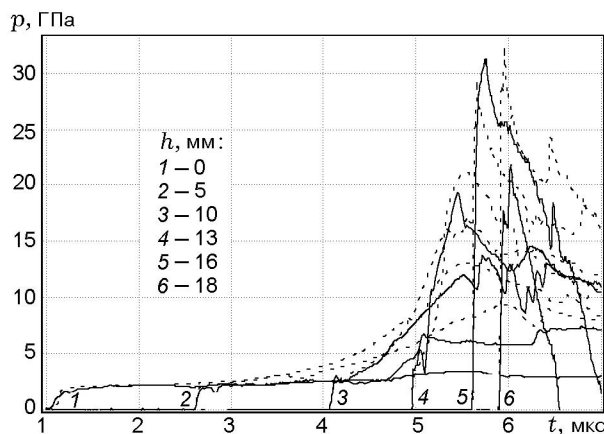


Рис. 19. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) профили давления в LX-04, нагретом до 170 °С (алюминиевый ударник со скоростью 0.515 км/с)

уравнении (2) был увеличен со 100 при  $T = 25$  °С до 210 при  $T = 150, 170$  °С и до 300 при  $T = 190$  °С, чтобы согласовать расчет с экспериментальными профилями [17].

Использование различных уравнений состояния и параметров в уравнении для скорости реакции в модели «Ignition and Growth» для ВВ при различных температурах дает хороший результат. Однако все скорости химических реакций зависят от локальной темпе-

ратуры молекул, реагирующих в это время. Поэтому, в конце концов, понадобится полностью температурно-зависимая модель реагирующего потока. Для калибровки подобной модели необходимо большое количество экспериментальных данных по зависимости температуры «горячих точек» и окружающего их ВВ от времени. Как только такие экспериментальные температурные данные станут доступными, гидродинамические компьютерные коды моделей реагирующих потоков для расчета одно-, дву- и трехмерных задач ударного инициирования и детонации будут полностью основываться на температурной зависимости закона Аррениуса, которая заменит используемые в настоящее время уравнения для скоростей реакции, зависящие от сжатия и давления [10]. В работе [19] сформулирована мезоструктурная модель, в которой отдельные частицы твердого ВВ вместе со связующим и порами перемешаны, подвергнуты ударному нагружению и либо реагируют, либо не реагируют по кинетике Аррениуса. Описание поведения отдельных частиц на больших масштабах невозможно даже при использовании сегодняшних мощных параллельных процессоров, поэтому в настоящее время разрабатывается и реализуется в гидродинамическом коде ALE3D континуальная модель реагирующего потока «Statistical hot spot» [20]. В этой модели предполагается, что инициирующий ударный фронт, сжимающий ВВ, образует практически разумное число горячих точек различных размеров, форм и температур в зависимости от начального объема пор, распределения частиц ВВ по размеру и температуры самого ВВ. Горячие точки затем либо реагируют и продолжают расти в окружающее их ВВ в соответствии с многоступенчатой кинетикой Аррениуса [21], либо перестают реагировать и исчезают. При помощи этой модели впервые удалось точно описать хорошо известный экспериментальный эффект «ударной десенситизации» — затухание УВ при распространении по предварительно ударно-сжатому ВВ [20, 22]. Слияние растущих горячих точек при высоких давлениях и температурах, возникновение дополнительной поверхности, доступной для образования реагирующих участков, и быстрый переход к детонации — это три наиболее перспективные в настоящее время проблемы в области моделирования ударного инициирования и детонации в твердых гетерогенных ВВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J. H. S. Initiation of gaseous detonation // *Ann. Rev. Phys. Chem.* 1977. V. 28. P. 75–104.
2. Dremin A. N. *Toward Detonation Theory*. New York: Springer-Verlag, 1999. Ch. 2.
3. Bowden F. P., Yoffe Y. D. *Initiation and Growth of Explosion in Liquids and Solids*. Cambridge Univ. Press, 1985.
4. Urtiew P. A., Forbes J. W., Tarver C. M., Garcia F. Calibration of manganin pressure gauges at 250 °C // *Shock Compression of Condensed Matter-1999* / M. D. Furnish, L. C. Chhabildas, R. S. Nixon (Eds). AIP Conf. Proc. 2000. V. 515. P. 1019–1022.
5. Уртъев П. А., Эрикссон Л. М., Хейс Б., Паркер М. А. Измерение давления и массовой скорости в твердых телах при динамическом нагружении // *Физика горения и взрыва*. 1986. Т. 22, № 5. С. 113–126.
6. Urtiew P. A., Cook T. M., Maieschein J. L., Tarver C. M. Shock sensitivity of IHE at elevated temperatures // *Tenth Intern. Detonation Symp., ONR 33395-12*. Boston, MA, 1993. P. 139–147.
7. Urtiew P. A., Tarver C. M., Maieschein J. L., Tao W. C. Effects of confinement and thermal cycling on the shock initiation of LX-17 // *Combust. Flame*. 1996. V. 105. P. 43–53.
8. Urtiew P. A., Tarver C. M., Forbes J. W., Garcia F. Shock sensitivity of LX-04 at elevated temperatures // *Shock Compression of Condensed Matter-1997* / S. C. Schmidt, D. P. Dandekar, J. W. Forbes (Eds). AIP Press, 2000. P. 727–730.
9. Forbes J. W., Tarver C. M., Urtiew P. A., Garcia F. The effects of confinement and temperature on the shock sensitivity of solid explosives // *Eleventh Intern. Detonation Symp., ONR 33300-5*. Snowmass, CO, 1998. P. 147–152.
10. Tarver C. M., Hallquist J. O., Erickson L. M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives // *Eighth Symp. (Intern.) on Detonation*. Naval Surface Weapons Center NSWC MP86-194. Albuquerque, NM, 1985. P. 951–961.
11. Tarver C. M., Kury J. W., Breithaupt R. D. Detonation waves in triaminotrinitrobenzene // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. P. 3771–3782.
12. Tarver C. M., Breithaupt R. D., Kury J. W. Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 7193–7202.
13. Tarver C. M., Tao W. C., Lee C. G. Sideways plate push test for detonating solid explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1996. V. 21. P. 238–246.
14. Tarver C. M., Forbes J. W., Garcia F., Urtiew P. A. Manganin gauge and reactive flow modeling study of the shock initiation of PBX

- 9501 // Shock Compression of Condensed Matter-2001 / M. D. Furnish, N. N. Thadhani, Y. Horie (Eds). AIP Press, 2002. P. 1043–1046.
15. **Gustavsen R. L., Sheffield S. A., Alcon R. R., et al.** Embedded electromagnetic gauge measurements and modeling of shock initiation in the TATB explosives PBX 9502 and LX-17 // Ibid. P. 1019–1022.
  16. **Urtiew P. A., Forbes J. W., Garcia F., Tarver C. M.** Shock initiation of UF-TATB at 250 °C // Ibid. P. 1039–1042.
  17. **Urtiew P. A., Forbes J. W., Tarver C. M., et al.** Shock sensitivity of LX-04 containing delta phase HMX at elevated temperatures // Shock Compression of Condensed Matter-2003 / M. D. Furnish (Ed.). AIP Press, 2004. P. 1053–1056.
  18. **Tarver C. M., Forbes J. W., Urtiew P. A., Garcia F.** Shock sensitivity of LX-04 at 150 °C // Shock Compression of Condensed Matter-1999 / M. D. Furnish, L. C. Chhabildas, R. S. Hixon. (Eds). AIP Conf. Proc. V. 515. 2000. P. 891–894.
  19. **Reaugh J. E.** Grain-scale dynamics in explosives. LLNL Report UCID-150388, Sept. 2001.
  20. **Nichols A. L., Tarver C. M.** A statistical hot spot reactive flow model for shock initiation and detonation of solid high explosives // Twelfth Intern. Detonation Symp., ONR 333-05-2. San Diego, CA, 2002. P. 489–496.
  21. **Tarver C. M., Chidester S. K., Nichols A. L.** Critical conditions for impact- and shock-induced hot spots in solid explosives // J. Phys. Chem. 1997. V. 100. P. 5794–5799.
  22. **Nichols A. L., Tarver C. M., McGuire E. M.** ALE3D statistical hot spot model results for LX-17 // Shock Compression of Condensed Matter-2003 / M. D. Furnish (Ed.). AIP Press, 2004. P. 397–400.

*Поступила в редакцию 7/II 2005 г.*

---