

УДК 534.222.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К УДАРНОМУ ИНИЦИИРОВАНИЮ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА LX-04

Z.-S. Wang, Q. Jing, Q.-M. Liu, Y. Shen, C.-Q. Liu

State Key Laboratory of Explosion and Science, Beijing Institute of Technology, Beijing, China
1093503798@qq.com

Взрывчатые вещества (ВВ) часто подвергаются воздействию различных температур в боевых условиях. Характеристики ударного инициирования ВВ связаны с их свойствами и температурой окружающей среды. В настоящей работе определены параметры модели Ignition and Growth для состава LX-04 при различных температурах на основе экспериментов по ударному инициированию. Методом имитационного моделирования чувствительности к удару LX-04 при начальных температурах 25, 60, 100, 150 и 170 °C определена критическая скорость удара — 325, 280, 233, 201 и 194 м/с соответственно. На основе этих данных предложена новая модель, устанавливающая соотношение между критической скоростью удара и начальной температурой. Показано, что начальная температура значительно влияет на детонационные характеристики ВВ: чем она выше, тем выше ударная чувствительность LX-04 и пиковая температура детонации.

Ключевые слова: температура, взрывчатое вещество LX-04, ударное инициирование, модель Ignition and Growth, тепловой эффект, чувствительность к удару.

DOI 10.15372/FGV20230113

ВВЕДЕНИЕ

Технология ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ (ВВ) всегда была в центре внимания исследователей с момента ее появления в 1960-х годах [1]. В этой технологии ударники непосредственно воздействуют на ВВ, образуя большое количество горячих точек с высокой температурой и разными временами задержки детонации. Энергия, генерируемая горячей точкой, постоянно возрастает, формируя всё больше и больше горячих точек, и в конечном итоге происходит переход к полной детонации. Этот метод обладает высокой надежностью перехода к детонации и широко используется в системах вооружения, аэрокосмической промышленности, управляемых боеприпасах и т. д. В [2] исследовался процесс ударно-волнового инициирования ВВ с использованием теста на чувствительность и определялась критическая скорость ударника для перехода к детонации ВВ. В этой работе были рассчитаны также критическое давление детонации, ее продолжительность и определены критические условия ударно-волнового инициирования. Реакция ВВ на инициирование ударом связана не только со свойствами ВВ, но и

с температурой окружающей среды. В [3] было обнаружено, что ударно-волновая чувствительность нагретого до 170 °C октогена значительно ниже, чем при нагреве до 190 °C. Авторы предположили, что кристаллическая трансформация октогена при высоких температурах приводит к существенному увеличению его чувствительности к удару. В работе [4] предложена полуэмпирическая модель макродинамики ударного инициирования ТАТБ, в которой использовались предположение о существовании горячих точек, уточненное тепловое уравнение состояния ВВ и концепция переноса энергии электронами. Путем экспериментов и численных расчетов установлено, что начальная температура ТАТБ оказывает существенное влияние на время детонации при низкоскоростном ударе.

Ввиду высокой стоимости материалов и требований безопасности, большинство экспериментов с энергетическими материалами нельзя повторить несколько раз. Поэтому в основном используются методы численного моделирования, основанные на процедуре конечных элементов, которые позволяют обеспечить теоретические основы и прогнозирование параметров для крупномасштабных инженерных приложений. В настоящее время су-

существует множество макроскопических феноменологических и эмпирических математических моделей скорости реакции. Среди них наиболее широко используется модель Ignition and Growth, предложенная в [5]. В усовершенствованном виде эта модель была применена для изучения детонационных характеристик взрывчатых составов PBX-9404 [6], LX-17 [7] и для описания инициирования ВВ при комнатной температуре. При изменении состава ВВ и условий окружающей среды параметры скорости реакции необходимо скорректировать на основе новых экспериментальных данных.

Состав LX-04, содержащий 85 % октогена и 15 % связующего пластика Viton, представляется перспективным в качестве инициирующего ВВ в детонаторах со взрывающейся фольгой (слэппер-детонаторы). В настоящее время чувствительность состава LX-04 к удару хорошо исследована [8, 9]. Результаты экспериментов [10–12] по нагружению шашек LX-04 ударниками при различных температурах используются в качестве справочных данных. Регулируя параметры уравнения состояния реагента и первую скорость роста в уравнении скорости реакции, можно подобрать параметры модели Ignition and Growth при различных температурах. Таким образом, влияние температуры окружающей среды на инициирование ВВ можно контролировать минимальным набором параметров. Полученные параметры модели Ignition and Growth можно использовать для расчета чувствительности к удару шашек LX-04 при различных начальных температурах.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Модель Ignition and Growth применяется для описания динамического отклика твердых ВВ на удар, включая процесс распространения детонационных волн. Эта модель также позволяет описывать процесс горения и выделения энергии в идеальном высокоэнергетическом ВВ. При относительно низком начальном давлении для точного описания состояния непрореагировавших высокоэнергетических ВВ используется уравнение состояния в сочетании с упругопластическим определяющим уравнением [5]. Уравнения состояния взяты в форме JWL (Джонса — Уилкинса — Ли):

$$p_e = A_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_{e1} V_e} \right) \exp(-R_{e1} V_e) +$$

$$+ B_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_{e2} V_e} \right) \exp(-R_{e2} V_e) + \frac{\omega_e c_{v,e} T_e}{V_e}, \quad (1)$$

$$p_p = A_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R_{p1} V_p} \right) \exp(-R_{p1} V_p) + B_p \left(1 - \frac{\omega_p}{R_{p2} V_p} \right) \exp(-R_{p2} V_p) + \frac{\omega_p c_{v,p} T_p}{V_p}, \quad (2)$$

где p_e и p_p — давление непрореагировавшего ВВ (индекс e) и продуктов реакции (индекс p), Мбар; V_e и V_p — относительный объем; T_e и T_p — температура; ω_e и ω_p — коэффициент Грюнайзена; $c_{v,e}$ и $c_{v,p}$ — средняя теплоемкость при постоянном объеме; A_e , A_p , B_e , B_p , R_{e1} , R_{e2} , R_{p1} , R_{p2} — константы. Непрореагировавшее ВВ превращается в продукты химической реакции. Состояние смеси непрореагировавшего ВВ и продуктов реакции рассчитывается путем определения доли прореагировавшего ВВ F ($F = 0$ означает отсутствие реакции, $F = 1$ — завершение реакции) в сочетании с уравнением состояния. В предположении, что температуры и давления непрореагировавшего ВВ и продуктов реакции равны ($T_e = T_p$, $p_e = p_p$), общий объем представляет собой сумму относительных объемов двух частей:

$$V = (1 - F)V_e + V_p. \quad (3)$$

Химическая реакция превращения непрореагировавших ВВ в продукты включает в себя три физических этапа реализации: во-первых, малое количество горячих точек, запускающих реакцию воспламенения после ударно-волнового сжатия; во-вторых, медленное распространение реакции воспламенения; в-третьих, быстрое завершение реакции в условиях высокой температуры и давления. Уравнение скорости реакции выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = A(1 - F)^B \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - M \right)^D + G_1(1 - F)^N F^X p^Y + G_2(1 - F)^H F^I p^K, \quad (4)$$

где ρ и ρ_0 — соответственно текущая и начальная плотность материала (задающие степень сжатия), G_1 , G_2 — первая и вторая скорость реакции, p — давление детонации, A , B , D , H , I , K , M , N , X , Y — константы скорости реакции. Первое слагаемое (зажигание) отвечает

Таблица 1

Условия эксперимента и моделирования

Номер эксперимента	Ударник		ВВ		Скорость соударения, м/с	Источник
	Материал	Толщина, мм	Толщина, мм	Температура, °C		
1	Steel	15	55	25	509	[12]
2	6061Al	12.7	20	170	643	[11]
3	6061Al	12.7	20	170	515	[11]
4	6061Al	12.7	20	150	1080	[10]
5	6061Al	12.7	20	150	701	[10]

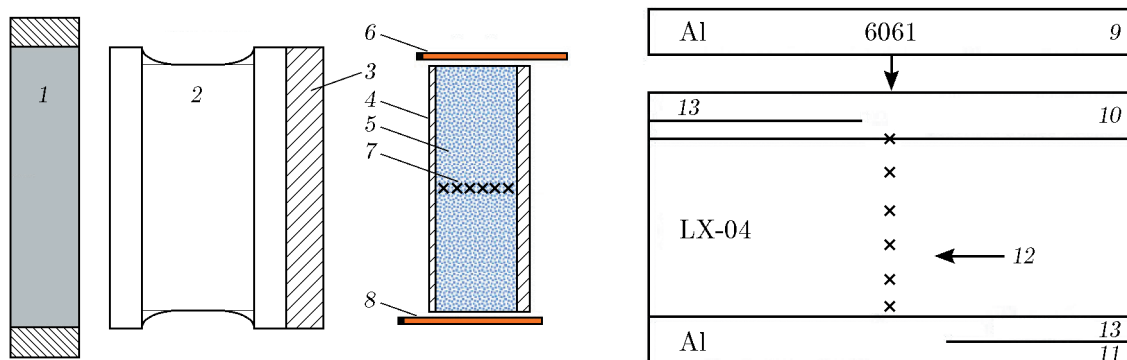


Рис. 1. Схема экспериментального устройства [11]:

1 — пушка калибра 101 мм, 2 — поддон, 3 — толстый ударник, 4 — буферная пластина, 5 — образец LX-04 (несколько дисков), 6 — датчики перекоса ударника, 7 — встроенные датчики, 8 — датчики скорости ударника, 9 — ударник, 10 — передняя алюминиевая пластина, 11 — задняя алюминиевая пластина, 12 — манганиновые датчики, 13 — нагреватель

за воспламенение и контролирует образование горячих точек; второй член (дефлаграция) соответствует относительно медленному процессу развития очага; третье слагаемое описывает процесс быстрого завершения реакции при переходе к детонации. Кроме того, в этой модели установлено несколько диапазонов изменения F для управления открытием или закрытием трех слагаемых скорости: при $F \geq F_{ig\max}$ член зажигания равен нулю, при $F \geq F_{G1\max}$ член, описывающий ускорение реакции, равен нулю, а при $F \leq F_{G2\min}$ реакция завершается.

В настоящей работе на основании данных [10–12] по нагружению шашек LX-04 ударниками при разных начальных температурах подобраны параметры модели Ignition and Growth в зависимости от температуры. В табл. 1 приведены параметры пяти групп экспериментов. Каждая группа испытаний выполнялась одним и тем же методом. Для ускорения ударника использовалась легкогазовая пушка. Высокоскоростной ударник сталкивался с буферной пла-

стиной, и волна сжатия проходила в цилиндрическую мишень из ВВ. Для регистрации давления в заранее определенных координатах ВВ было установлено 11 пьезорезистивных манганиновых датчиков. Для имитации температуры окружающей среды нагревательные провода размещались внутри буферной пластины и отражателя, а ударно-волновое нагружение проводилось при достижении заданной температуры ВВ. Принципиальная схема экспериментального устройства из работы [11] представлена на рис. 1.

В этой статье используется программное обеспечение для моделирования нелинейной динамики процесса ударного инициирования. Размер имитационной модели и положение контрольных точек соответствуют схеме эксперимента и показаны на рис. 2. Следует отметить, что из-за установленных ограничений при построении трехмерной осесимметричной модели в плоскости симметрии возникает значительное сдвиговое напряжение. Это напряжение вы-

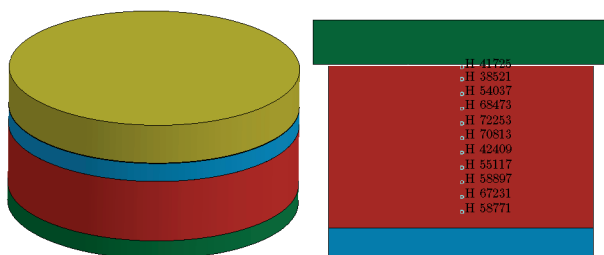


Рис. 2. Схема моделирования

зывает большие помехи при расчете доли прореагировавшего ВВ и влияет на точность результатов. Поэтому в данной работе для имитационных расчетов используется полная трехмерная модель.

В экспериментах ударник был изготовлен из стали либо алюминия, буферная пластина и отражатель — из алюминиевого сплава 6061-T6, в качестве ВВ использовался LX-04. Для описания LX-04 принято упругопластическое определяющее уравнение и модель Ignition and Growth. Конкретные параметры ВВ приведены в табл. 2. Начальная плотность зависит от температуры, а остальные параметры остаются неизменными. Для контроля влияния температуры в уравнении скорости реакции регулируются параметр уравнения состояния реагента B_e и первая скорость роста реакции G_1 , что обеспечивает минимальное число параметров управления. Для того чтобы обеспечить корректность результатов расчета, необходимо проверить упрощенную модель на соответствие экспериментальным данным [13].

Стальные и алюминиевые пластины описывались упругопластическими определяющими уравнениями и уравнением состояния Грюнайзена:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + a\mu)E, \quad \mu > 0, \quad (5)$$

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E, \quad \mu \leq 0, \quad (6)$$

где $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; E — тепловая энергия; C — константа, полученная подгонкой скорости удара и массовой скорости; γ_0 — постоянная Грюнайзена; a — константа, соответствующая γ_0 ; S_1, S_2, S_3 — константы. Параметры металлов приведены в табл. 3.

2. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим условия эксперимента 4. В расчетной модели началом координат считается поверхность соударения, установлено 11 контрольных точек с интервалом 2 мм. На рис. 3 показаны зависимости давления, доли прореагировавшего ВВ и температуры в образце LX-04 от времени при ударе алюминиевой пластиной со скоростью 1080 м/с. На расстоянии 6 мм от поверхно-

Таблица 2

Параметры ВВ

Параметры уравнения JWL				Параметры уравнения скорости реакции	
Реагент	Продукты				
$A_e = 9\,522$ Мбар B_e (зависит от T_0) $R_{e1} = 14.1$ $R_{e2} = 1.41$ $\omega_e = 0.8867$ $c_{v,e} = 2.7806 \cdot 10^{-5}$ Мбар/К	$A_p = 8.364$ Мбар $B_p = -0.1298$ Мбар $R_{p1} = 4.62$ $R_{p2} = 1.25$ $\omega_p = 0.42$ $c_{v,p} = 1.0 \cdot 10^{-5}$ Мбар/К			$A = 7.43 \cdot 10^{11}$ $M = 0$ $B = 0.667$ $D = 20.0$ G_1 (зависит от T_0) $N = 0.667$ $F_{ig\max} = 0.3, F_{G1\max} = 0.5, F_{G2\min} = 0.5$	$G_2 = 400$ $H = 0.333$ $T = 1.0$ $K = 2.0$ $Y = 2.0$ $X = 0.333$

Начальная температура, °C	Плотность, г/см ³	Модуль сдвига, Мбар	Предел текучести, Мбар	Параметр реагента B_e	G_1
25	1.868	0.0474	0.002	−0.05822	100
150	1.79	0.0474	0.002	−0.072063	200
170	1.77	0.0474	0.002	−0.074083	210

Таблица 3

Параметры металлов

Материал	Упругопластические определяющие параметры			Параметры уравнения состояния Грюнайзена					
	Плотность, г/см ³	Модуль сдвига, Мбар	Предел текучести, Мбар	C , см/мкс	S_1	S_2	S_3	γ	a
6061Al	2.703	0.0042	0.27	0.524	1.4	0	0	1.97	0.48
Сталь	7.9	0.0156	0.718	0.457	1.49	0	0	1.93	0.5

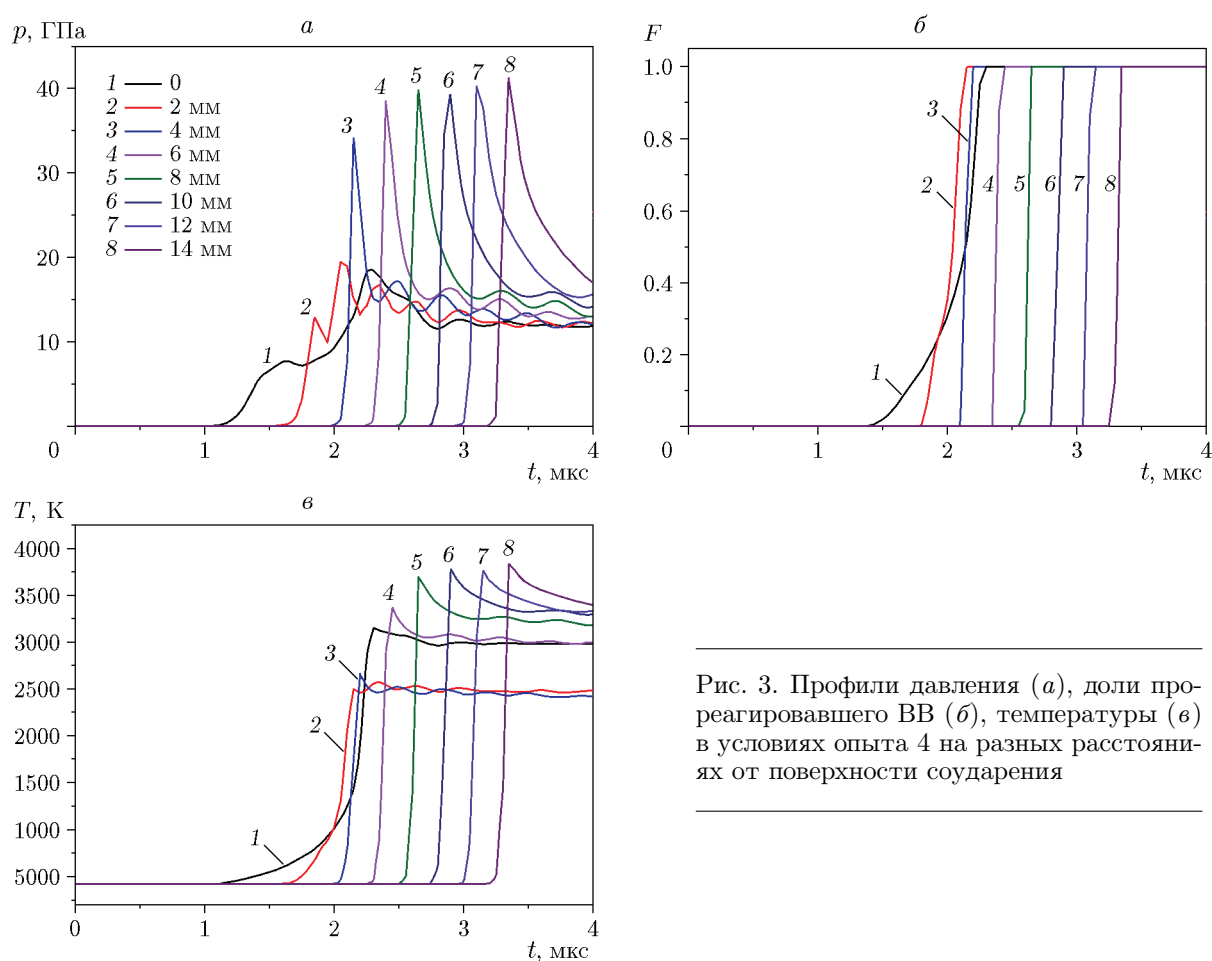


Рис. 3. Профили давления (*a*), доли прореагировавшего ВВ (*б*), температуры (*в*) в условиях опыта 4 на разных расстояниях от поверхности соударения

сти соударения амплитуда детонационного пика давления составляет ≈ 38 ГПа; доля прореагировавшего ВВ во всех контрольных координатах достигает 1, что свидетельствует о завершении реакции ВВ в течение 3 мкс после удара; пиковая температура на стадии стабильной детонации около 3800 К. Давление на глубине 4 мм резко возросло, доля прореагировавшего ВВ достигла 1, а температура мгновенно достигла своего пика, что свидетельствует об установлении режима детонации в

этой координате. С другой стороны, несмотря на развитие реакции в координатах 0 и 2 мм, параметрические характеристики детонационной волны на этих глубинах не проявляются. Следовательно, в данном случае расстояние от плоскости удара до возникновения детонации (SDT) находится в диапазоне $2 \div 4$ мм (точнее см. табл. 4).

Следует заметить, что при использовании нелинейного динамического анализа в модели Ignition and Growth необходимо задать

Таблица 4

Данные экспериментов по ударному инициированию и результаты расчета

Номер опыта	Скорость соударения, м/с	Начальное давление соударения, ГПа		SDT, мм		Источник
		эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	
1	509	2.6	3.0	20 ÷ 25	23	[12]
2	643	3.3	3.7	10 ÷ 13	11.5	[11]
3	515	2.3	2.5	13 ÷ 16	14.5	[11]
4	1080	5.8	6.1	0 ÷ 3	3	[10]
5	701	4.1	4.1	8 ÷ 10	8.5	[10]

теплоту реакции ВВ (начальная внутренняя энергия), которая оказывает критическое влияние на параметры детонации. В расчетной модели экзотермическая теплота реакции в реальном масштабе времени получается из доли прореагировавшего ВВ и теплоты реакции. Поскольку инициирование происходит быстро, этот процесс является адиабатическим. Давление и температура связаны уравнением состояния продуктов JWL. Этот метод подходит для наблюдения за температурой при инициировании детонации в течение короткого времени. Давление и температура детонации после достижения пикового значения снижаются в течение некоторого времени, что в основном вызвано расширением продуктов детонации. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента проводилось по таким ключевым параметрам, как ударное давление, расстояние до возникновения детонации, детонационное давление, температура и скорость детонации. В табл. 4 приведены данные пяти групп экспериментов по ударному инициированию и результаты соответствующих расчетов по двум основным параметрам. Сравнение показывает, что расчетное начальное ударное давление немного превышает экспериментальное значение, однако динамика процесса и расстояние до возникновения детонации хорошо согласуются. Это показывает, что параметры ВВ выбраны корректно и хорошо описывают характеристики ударного инициирования LX-04.

Характеристики ударного инициирования в основном зависят от параметров ВВ, важное влияние на результаты моделирования оказывают также параметры и начальные условия материала ударника и буферной пластины. В процессе ударного инициирования ВВ по

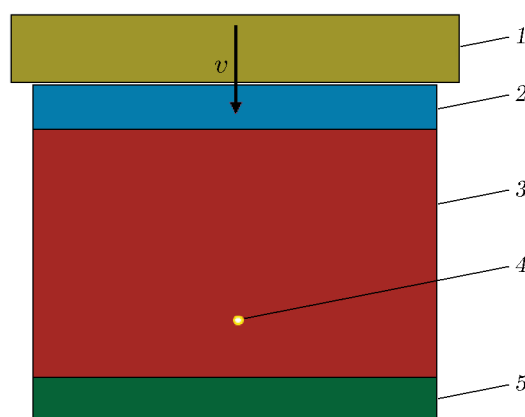


Рис. 4. Схема расчета ударной чувствительности:

1 — ударник, 2 — буферная пластина, 3 — ВВ, 4 — координата датчика, 5 — отражатель

ударнику циркулируют волны сжатия и разгрузки до тех пор, пока его скорость не упадет до определенного уровня или не произойдет детонация ВВ. Параметры материала и начальные условия влияют на вышеуказанный процесс. Применяемые металлические материалы соответствуют требованиям.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ LX-04 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В эксперименте не было возможности точно измерить начальную скорость ударника, в то время как моделирование позволяет с высокой точностью контролировать начальную скорость ударника и ее градиент. Выше отмечалось, что были определены подгоночные параметры модели Ignition and Growth для состава LX-04 при различных температурах. В этом параграфе при расчете ударной чувствитель-

ности LX-04 к условиям опыта 1 добавлены два температурных режима при 60 и 100 °С. Схема расчетной модели показана на рис. 4. В расчетной модели стальной ударник представлял собой цилиндр диаметром 100 мм и толщиной 15 мм, масса ударника 0.6 кг; диаметр и толщина ВВ 90 и 55 мм соответственно; диаметр и толщина алюминиевой буферной пластины и отражателя 90 и 10 мм соответственно. Для наблюдения за детонацией ВВ контрольная точка устанавливалась на оси заряда ВВ на расстоянии 45 мм от поверхности соударения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамические характеристики ВВ зависят от скорости ударника. При низкоскоростном ударе ВВ подвергается небольшому начальному ударному давлению. Динамика процесса перехода этой первичной волны в стационарную детонацию ВВ подробно описана в [11]. ВВ может детонировать только при достижении определенного давления, в противном случае доля прореагировавшего ВВ стабилизируется на небольшом значении, а пиковые давление и температура относительно малы. При отражении падающей волны от нижней пластины происходит наложение падающей и отраженной волн сжатия, что приводит к образованию точки высокого давления. При увеличении давления до определенного значения детонация распространяется от нижней части заряда. Кроме того, моделирование показало, что в ходе реакции расширение продуктов формирует вторичную волну сжатия в не полностью прореагировавшем ВВ, так что эта часть ВВ быстро завершает реакцию в ударной волне высокого давления, что приводит к устойчивой детонации. В контрольной точке перед детонацией наблюдаются два пика давления, а их относительная величина связана с состоянием ВВ при ударе.

На рис. 5 показаны распределения пикового давления, доли прореагировавшего ВВ и пиковой температуры в контрольных координатах при различных скоростях стальных ударников (v). Видно, что при начальных температурах $T_0 = 25, 60, 100, 150$ и 170 °С критические скорости составляют 325, 280, 233, 201 и 194 м/с соответственно. Это означает, что ударная чувствительность LX-04 постепенно увеличивается с повышением температуры окружающей среды и не описывается простой

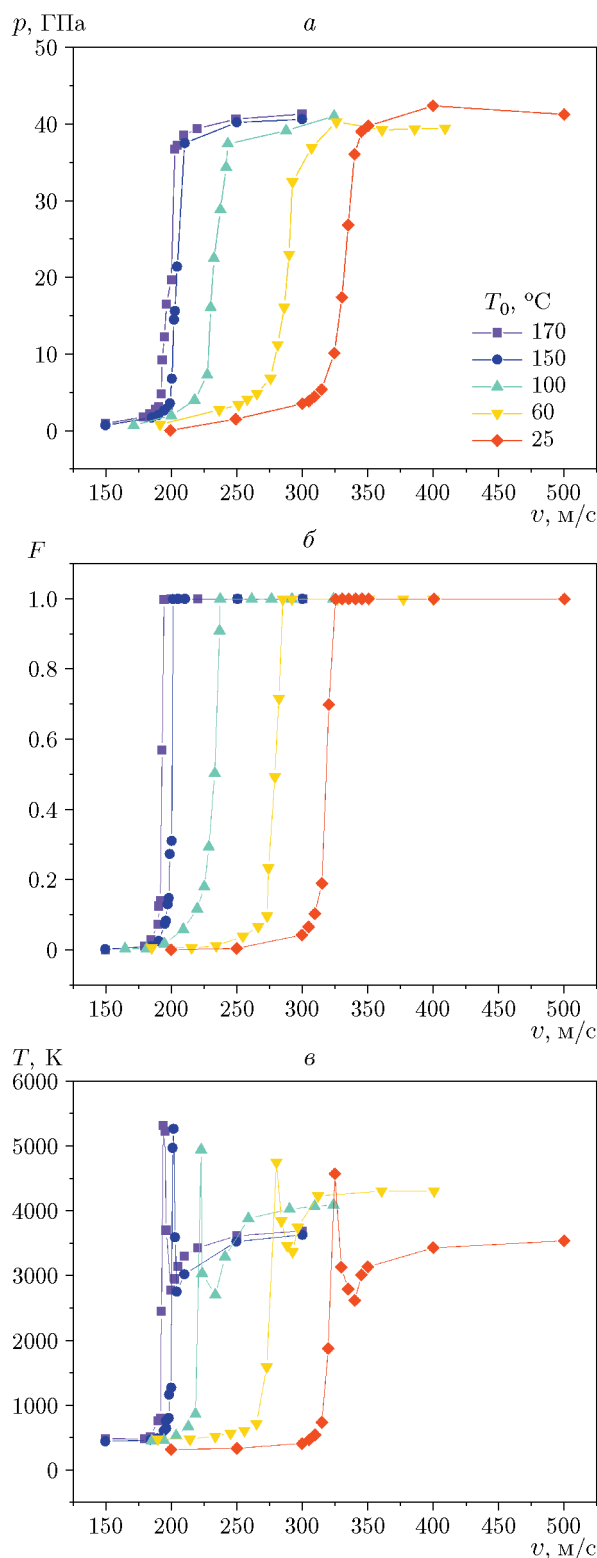


Рис. 5. Зависимость пикового давления (*a*), доли прореагировавшего ВВ (*б*), температуры ВВ LX-04 (*в*) от скорости ударника при различной начальной температуре

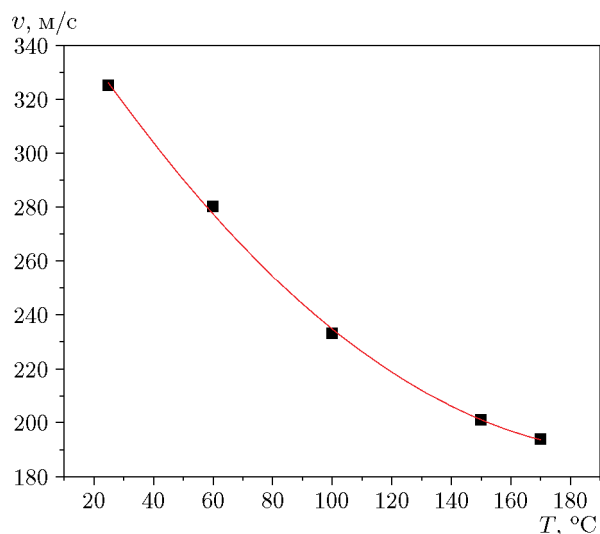


Рис. 6. Аппроксимирующая зависимость критической скорости стального ударника, вызывающего детонацию LX-04, от температуры окружающей среды

линейной функцией. Предполагается, что зависимость критической скорости ударника, вызывающей детонацию состава LX-04, от температуры окружающей среды имеет вид

$$v = \alpha + \beta T + \gamma T^2. \quad (7)$$

Полученные данные экспериментов аппроксимированы методом наименьших квадратов, результаты показаны на рис. 6. Параметры подгонки $\alpha = 367.25$, $\beta = -1.76$, $\gamma = 0.0043$, а остаточная сумма квадратов после подгонки составляет всего 11.2, т. е. аппроксимирующая функция является достаточно точной. Формула (7) может применяться для оценки ударной чувствительности LX-04 при повышенных температурах.

Кроме того, пиковые температуры детонации при $T_0 = 25, 60, 100, 150$ и 170 °C составляют 4576, 4749, 4944, 5271 и 5311 K соответственно, а пиковые давления — 42.4, 40.6, 41.1, 40.3 и 41.3 ГПа. Это показывает, что температура детонации LX-04 также увеличивается с ростом начальной температуры T_0 , но влияние начальной температуры на пиковое давление детонации LX-04 не очевидно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных по ударному инициированию LX-04 при различных начальных температурах определены параметры модели Ignition and Growth для этого ВВ. Влияние на-

чальной температуры регулируется параметром уравнения состояния реагента B_e и первой скоростью роста реакции G_1 . Для моделирования ударного воспламенения и процесса перехода дефлаграции в детонацию ВВ при различных начальных температурах используется программное обеспечение нелинейной динамики. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На основе полученных параметров модели Ignition and Growth определена ударная чувствительность LX-04 при пяти температурах, а критическая скорость удара стального ударника при начальных температурных условиях $25 \div 170$ °C составила $325 \div 194$ м/с. Начальная температура ВВ оказывает значительное влияние на характеристики детонации. Чем выше начальная температура, тем выше ударная чувствительность LX-04 и выше пиковая температура детонации. Изменение критической скорости стального ударника, вызывающего детонацию состава LX-04 в зависимости от температуры окружающей среды, описывается зависимостью $v = 367.2 - 1.76T + 0.0043T^2$, которая является ориентиром для последующих экспериментов по ударному инициированию при различных начальных температурах.

Работа выполнена при поддержке National Key Research and Development Program of China (проект 2017YFC0804705) и National Natural Science Foundation of China (проект 11572044).

ЛИТЕРАТУРА

1. Keller D. V., Penning J. R., Jr. Exploding Foils — The Production of Plane Shock Waves and the Acceleration of Thin Plates // Exploding Wires / W. G. Chace, H. K. Moore (Eds). — Springer, 1962. — P. 263–277. — DOI: 10.1007/978-1-4684-7505-0.21.
2. Schwarz A. C. New technique for determining the shock initiation sensitivity of explosives // Rep. No. SAND-77-0416C, Sandia Lab. — Albuquerque, USA, 1977.
3. Kennedy J. E., Schwarz A. C. Detonation transfer by flyer plate impact // 8th Symp. on Explosives and Pyrotechnics. — Lawrence Livermore National Lab., 1974.
4. Гребенкин К. Ф., Жеребцов А. Л., Тараник М. В., Царенкова С. К., Шнитко А. С. Физическая модель ударно-волнового инициирования детонации пластифицированного ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 117–126.

5. **Lee E. L., Tarver C. M.** Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // *Phys. Fluids*. — 1980. — V. 23, N 12. — P. 2362–2372. — DOI: 10.1063/1.862940.
6. **Tarver C. M.** Detonation reaction zones in condensed explosives // *AIP Conf. Proc.* — 2006. — V. 845, N 1. — P. 1026–1029. — DOI: 10.1063/1.2263497.
7. **Tarver C. M., Chidester S. K.** Modeling LX-17 detonation growth and decay using the ignition and growth model // *AIP Conf. Proc.* — 2009. — V. 1195, N 1. — P. 249–252. — DOI: 10.1063/1.3295115.
8. **Forbes J. W., Tarver C. M., Urtiew P. A., Garcia F.** The effects of confinement and temperature on the shock sensitivity of solid explosives // 11th Int. Detonation Symp. — Lawrence Livermore National Lab., 1988. — P. 145–152.
9. **Urtiew P. A., Forbes J. W., Tarver C. M., Vandersall K. S., Garcia F., Greenwood D. W., Hsu P. C., Maienschein J. L.** Shock sensitivity of LX-04 containing delta phase HMX at elevated temperatures // *AIP Conf. Proc.* — 2004. — V. 706, N 1. — P. 1053–1056. — DOI: 10.1063/1.1780419.
10. **Tarver C. M., Forbes J. W., Urtiew P. A., Garcia F.** Shock sensitivity of LX-04 at 150 °C // *AIP Conf. Proc.* — 2000. — V. 505, N 1. — P. 891–894. — DOI: 10.1063/1.1303611.
11. **Urtiew P. A., Tarver C. M., Forbes J. W., Garcia F.** Shock sensitivity of LX-04 at elevated temperatures // *AIP Conf. Proc.* — 1998. — V. 429, N 1. — P. 727–730. — DOI: 10.1063/1.55673.
12. **Vandersall K. S., Tarver C. M., Garcia F., Chidester S., Urtiew P. A., Forbes J. W.** Low amplitude single and multiple shock initiation experiments and modeling of LX-04 // 13th Symp. (Int.) on Detonation: Norfolk, VA, USA, July 23–28, 2006. — P. 904–913.
13. **Sanchidrián J., Castedo R., López L., Segarra P., Santos A.** Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2015. — V. 12, N 2. — P. 177–194.

Поступила в редакцию 28.02.2022.

После доработки 11.05.2022.

Принята к публикации 22.06.2022.