

КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР ДЕТОНАЦИИ ГЛУБОКОФЛЕГМАТИЗИРОВАННЫХ МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
kobylikin_ivan@mail.ru

Исследуется детонационная способность малочувствительных многокомпонентных взрывчатых составов на основе гексогена или октогена, содержащих 12 ÷ 20 % полимерного связующего и, при необходимости, перхлорат аммония и алюминий. На основе разработанной ранее автором теории критического диаметра детонации неоднородных высокоплотных зарядов взрывчатых веществ получена аналитическая зависимость критического диаметра зарядов малочувствительных составов от содержания взрывчатого компонента. Обсуждается влияние размера частиц взрывчатого компонента на критический диаметр. При содержании взрывчатого компонента в пределах 5 ÷ 70 % достигнуто удовлетворительное согласие с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: детонация, критический диаметр, ударно-волновая чувствительность, кинетика разложения ВВ.

Взрывчатые составы с относительно высоким критическим давлением ударно-волнового инициирования детонации, превышающим 3 ÷ 4 ГПа, относят к малочувствительным взрывчатым составам. Их можно подразделить на две группы [1, 2]. В первую входят глубокофлегматизированные малопористые (пористость не превышает 0.5 %) или вовсе беспористые взрывчатые составы на основе гексогена или октогена с достаточно большим содержанием полимерного связующего (12 ÷ 20 %). В зависимости от назначения составы этой группы могут содержать также алюминий, перхлорат аммония (ПХА), различные энергетические и технологические добавки. Многие из этих составов близки к смесевым твердым ракетным топливам (ТРТ), поскольку в качестве связующего в них используются синтетические каучуки. К первой группе также относят пластизольные взрывчатые смеси, в которых роль связующего выполняет пластизоль, образованный инертным или активным пластификатором, например жидким ВВ ФК (бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль, $C_5H_6N_4O_{10}F_2$), и гелеобразующим полимером, например сополимером Витан-2М [1–3]. Как правило, заряды из составов первой группы изготавливают литьем.

Основой второй группы составов, обладающих еще меньшей ударно-волновой чувствительностью по сравнению с первой группой, яв-

ляются специальные малочувствительные индивидуальные ВВ, такие как ТАТБ (триа-минотринитробензол), НТО (нитротриозолон), апрол или FOX-7 (диаминодинитроэтилен), дазин и др. Критическое давление ударно-волнового инициирования состава РВХ-9502, состоящего из ТАТБ (95 %) и полимерного связующего (5 %), достигает 10.5 ГПа [1]. Заряды из составов второй группы изготавливают как литьем, так и прессованием.

Возможность практического использования малочувствительных взрывчатых составов определяется не только их ударно-волновой чувствительностью, но и детонационной способностью, характеризуемой величиной критического диаметра зарядов d_{cr} . Можно настолько понизить ударно-волновую чувствительность взрывчатых составов, что критический диаметр изготовленных из них зарядов достигнет неприемлемо большого значения. Так, например, $d_{cr} = 178$ мм для зарядов из состава РВХW-122, включающего НТО — 47 %, гексоген — 5 %, ПХА — 20 %, Al — 15 %, связку — 13 % [2]. Критический диаметр некоторых образцов смесевых ТРТ, близких по составу к малочувствительным, может достигать несколько десятков сантиметров [3, 4]. Поэтому понимание физических процессов, определяющих предел детонации, и возможность количественной оценки критического диамет-

ра заряда представляются важными составляющими теоретической базы, необходимой для разработки высокоэффективных малочувствительных составов.

В настоящей статье на основе разработанной ранее автором теории критического диаметра получена аналитическая зависимость величины d_{cr} от содержания и размера частиц взрывчатого компонента в составах первой группы. Согласно [5, 6] критический диаметр цилиндрического заряда ВВ определяется соотношением

$$d_{cr} = \frac{4uc^2 \cos \varphi_*}{\Gamma Q_{p,V} W}, \quad (1)$$

где u и c — соответственно массовая скорость и скорость звука в ударно-сжатом ВВ непосредственно за ударным скачком в самом начале зоны химической реакции детонационного фронта; φ_* — угол наклона детонационного фронта к образующей цилиндрической поверхности заряда ВВ, при котором за ударным скачком на краю заряда реализуется звуковой режим течения ударно-сжатого ВВ; Γ — параметр Грюнайзена ударно-сжатого ВВ; $Q_{p,V}$ — тепловой эффект разложения ВВ при постоянных давлении p и объеме V ; W — начальная скорость разложения ВВ.

Поскольку все величины в (1) вычисляются непосредственно за фронтом детонационной волны, соотношение (1) позволяет рассчитать значение критического диаметра детонации как функцию скорости детонации, которая является независимой переменной. По существу, соотношение (1) позволяет на плоскости «диаметр заряда d — скорость детонации D » построить кривую обрыва детонации $d_{cr}(D)$. Для вычисления критического диаметра детонации необходимо знать критическую скорость детонации D_{cr} , которая заранее неизвестна. Данное обстоятельство является ограничением рассматриваемой теории критического диаметра. Поэтому, для того чтобы подтвердить количественное соответствие разработанной теории критического диаметра известным экспериментальным данным, критические параметры детонации в работах [5–7] определяли с использованием известных зависимостей скорости детонации от диаметра заряда $D(d)$. Критические параметры детонации d_{cr} и D_{cr} определяются в плоскости (d, D) координатами точки пересечения кривых $d_{cr}(D)$ и $D(d)$.

Для того чтобы использовать формулу (1) для вычисления критического диаметра зарядов из малочувствительных составов, необходимо определиться со значениями входящих в нее величин.

Массовая скорость u и скорость звука c в ударно-сжатом ВВ пропорциональны скорости детонации D , т. е. справедливо следующее соотношение пропорциональности:

$$u^2 c \sim D^3. \quad (2)$$

Значение угла φ_* для высокоплотных зарядов ВВ заключено в пределах $48 \div 53^\circ$, поэтому может быть принято равным среднему значению $\varphi_* \approx 50^\circ$. Параметр Грюнайзена Γ для большинства твердых ВВ слабо зависит от давления ударно-волнового сжатия и по порядку величины равен 1 [8]. Что касается теплового эффекта разложения $Q_{p,V}$ ударно-сжатого смешанного взрывчатого состава, то в общем случае можно записать

$$Q_{p,V} = x Q_{p,V}^{\text{ВВ}} + (1 - x) Q_{p,V}^{\Sigma},$$

где x и $Q_{p,V}^{\text{ВВ}}$ — массовая доля и тепловой эффект разложения взрывчатого компонента малочувствительного состава, в качестве которого используется, как правило, гексоген или октоген; $Q_{p,V}^{\Sigma}$ — суммарный тепловой эффект разложения остальных компонентов этого состава. Реакционные способности взрывчатых и остальных (алюминия, перхлората аммония, каучуков и др.) компонентов малочувствительного состава после ударно-волнового сжатия различаются весьма существенно. Достаточно правдоподобно предположение о том, что в начале зоны химической реакции детонационной волны реагирует только взрывчатый компонент, в то время как остальные остаются практически инертными и даже более того — могут частично поглощать выделяющуюся при разложении ВВ тепловую энергию, расходуя ее на эндотермические процессы деструкции связующего и диссипативные процессы, связанные с нагревом и ускорением инертных компонентов. В работе [9] утверждается, что такое поведение невзрывчатых компонентов малочувствительного состава сохраняется на протяжении всей зоны химической реакции детонационной волны. Это утверждение основывается на сравнении «детонационной» теплоты взрыва Q_d , вычисляемой по формуле $Q_d = \frac{D^2}{2(\gamma^2 - 1)}$ (γ —

Таблица 1

Сравнение общей и «детонационной» теплоты взрыва малочувствительных взрывчатых составов

Состав	Компоненты, %				Q , МДж/кг	Q_d , МДж/кг	Q_d/Q , %
	гексоген	Al	ПХА	связка			
Гексоген	100	—	—	—	5 033	4 769	94.7
PBXW-108	85	—	—	15	5 175	3 691	71.3
PBXW-109	65	20	—	15	7 879	3 327	42.6
PBXW-115	20	43	25	12	8 465	1 467	17.3

показатель политропы продуктов взрыва), и интегрального теплового эффекта Q разложения малочувствительного состава, содержащего гексоген, перхлорат аммония, алюминий и полибутадиеновый каучук, который вычисляется методами термохимии. Соответствующие данные, взятые из работы [9], приведены в табл. 1. Как следует из таблицы, «детонационная» теплота взрыва малочувствительного состава, выделяющаяся в зоне химической реакции, примерно соответствует содержанию гексогена. Остальная (значительная) часть тепловой энергии взрыва выделяется за звуковой поверхностью зоны химической реакции и не имеет прямого отношения к процессу детонации. Поэтому в формулу (1) вместо $Q_{p,V}$ следует подставлять тепловой эффект разложения только взрывчатого компонента:

$$Q_{p,V} = xQ_{p,V}^{BB}. \quad (3)$$

Тогда для скорости детонации D и давления p во фронте ударного скачка справедливы следующие соотношения пропорциональности:

$$D \sim \sqrt{xQ_{p,V}^{BB}}; \quad p \sim D^2 \sim xQ_{p,V}^{BB}. \quad (4)$$

Теперь необходимо определиться со скоростью разложения ВВ W . В общем случае скорость разложения неоднородных ВВ можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$W = W_{hom}(p) + W_{het}(p, S_0),$$

где $W_{hom}(p)$ — гомогенная составляющая скорости разложения ВВ, зависящая только от амплитуды ударной волны; $W_{het}(p, S_0)$ — гетерогенная составляющая скорости разложения ВВ, зависящая не только от давления, но и от структуры заряда ВВ, которую можно охарактеризовать начальной площадью поверхности

очагового горения ВВ S_0 . Для пористых зарядов ВВ S_0 обычно связывают с удельной поверхностью частиц ВВ s , которая в общем случае определяется не только дисперсностью, но и дефектностью частиц ВВ [6, 10].

Известно, что детонационная способность и ударно-волновая чувствительность зарядов из малочувствительных составов зависят от дефектности частиц взрывчатого компонента ВВ, что подтверждается имеющимися данными по этим составам на основе обычных и «улучшенных» ВВ [1, 2, 11, 12]. «Улучшение» внутренней структуры и формы частиц ВВ осуществляется путем перекристаллизации и «окатывания» частиц гексогена и октогена в специальных растворителях, в результате чего частицы приобретают округлую форму и более совершенную, практически беспористую структуру. К сожалению, до сих пор нет измеряемых параметров качества частиц ВВ, с помощью которых можно было бы количественно характеризовать детонационную способность и ударно-волновую чувствительность изготовленных из них малочувствительных составов, что ограничивает возможность прогнозирования их свойств. Поскольку «улучшенные» частицы ВВ становятся прозрачными, то остающиеся внутри них поры и дефекты имеют весьма малые размеры и потому вряд ли смогут стать «эффективными» локальными очагами химической реакции [10]. Тогда возникает вопрос о том, каков же механизм появления локальных разогревов в беспористых зарядах малочувствительного состава. Ответ на него дан в работе [13]. Вследствие различия сжимаемости и реологических характеристик ВВ, связующих и других компонентов малочувствительного состава в процессе ударного сжатия беспористой смеси происходит достаточно интенсивный разогрев поверхности частиц ВВ с их последующим зажиганием и поверхностным

горением. Поэтому в качестве начальной скорости разложения ВВ в зоне химической реакции детонационной волны следует взять только гетерогенную составляющую скорости разложения $W_{het}(p, S_0)$, а в качестве начальной площади поверхности очагового горения ВВ S_0 — удельную площадь внешней поверхности частиц ВВ s .

Поскольку в зоне химической реакции разлагается только взрывчатый компонент, то реакция разложения начинается в частицах ВВ и количество центров реакции $n_{ВВ}$ в зависимости от соотношения размера частиц и ширины зоны химической реакции будет пропорционально либо числу частиц ВВ n_s , приходящихся на единицу площади поверхности детонационного фронта, либо числу частиц ВВ в единице объема n_V . В соответствии с гетерогенным характером реакции разложения ВВ для ее скорости W запишем соотношение

$$W_{het} = W_0(p, s)n_{ВВ},$$

в котором $W_0(p, s)$ — средняя скорость разложения единичной частицы ВВ, зависящая главным образом от типа ВВ, давления ударного сжатия p , среднего характерного размера частицы ВВ δ . Предположение о том, что количество центров реакции пропорционально числу частиц ВВ n_s справедливо для значений массовой доли $x < 0.6 \div 0.7$, при которых частицы ВВ не касаются друг друга. При больших значениях x частицы ВВ соприкасаются друг с другом и число центров реакции, а следовательно, и скорость разложения ВВ W уже не будут пропорциональны n_s .

Конкретизировать зависимость $W_0(p, s)$ можно, приняв для разложения единичной частицы ВВ модель взрывного горения. В соответствии с этой моделью достаточно общее выражение для $W_0(p, s)$ можно записать в виде

$$W_0(p, s) = Bp^\nu S_p, \quad (5)$$

где B и ν — постоянные в законе горения, определяемые типом ВВ, S_p — средняя площадь поверхности частицы ВВ. Для последней справедливо соотношение пропорциональности

$$S_p \sim \delta^2.$$

В законе горения для большинства ВВ при высоком давлении показатель ν равен 1.

Объемная плотность частиц ВВ n_V в заряде из малочувствительного взрывчатого состава может быть вычислена по соотношению

$$n_V = \frac{\rho_0 x}{\rho_{ВВ} V_p},$$

в котором ρ_0 , $\rho_{ВВ}$ — плотности соответственно заряда и взрывчатого компонента; V_p — средний объем частицы ВВ. Так как различие плотностей ρ_0 и $\rho_{ВВ}$ незначительно, а $V_p \sim \delta^3$, то $n_V \sim x/\delta^3$. Поскольку поверхностная плотность частиц ВВ может быть определена с помощью соотношения $n_s = n_V^{2/3}$, то справедливо следующее соотношение пропорциональности:

$$n_s \sim \frac{x^{2/3}}{\delta^2}.$$

В общем случае для числа центров реакции в начале зоны химической реакции детонационной волны можно записать следующее соотношение пропорциональности:

$$n_{ВВ} \sim \frac{x^{m/3}}{\delta^m}, \quad (6)$$

в котором в зависимости от того, какая величина определяет число центров реакции — n_s или n_V , показатель m будет равен 2 или 3.

Подставляя соотношения (2)–(6) в формулу для критического диаметра (1) и объединяя постоянные величины и коэффициенты пропорциональности в один коэффициент A , получим окончательное выражение для d_{cr} :

$$d_{cr} = \frac{\delta^m}{\delta^2} \frac{A}{x^{m/3+\nu-1/2}}. \quad (7)$$

При $\nu = 1$ и $m = 2$ ($n_{ВВ} = n_s$) соотношение (7) принимает вид

$$d_{cr} = \frac{A}{x^{1.17}}, \quad (8)$$

согласно которому критический диаметр не зависит от размера частиц ВВ. При $\nu = 1$ и $m = 3$ ($n_{ВВ} = n_V$) критический диаметр оказывается линейно зависимым от размера частиц ВВ:

$$d_{cr} = \frac{A\delta}{x^{1.5}}. \quad (9)$$

Определить, какое из соотношений (8), (9) соответствует действительности, можно, сопоставляя определенные экспериментально критические диаметры зарядов из малочувствительных взрывчатых составов с различным содержанием взрывчатого компонента с вычисленными с помощью соотношений (8) и (9) значениями d_{cr} . Если малочувствительные взрывчатые составы изготавливаются на основе одного

Таблица 2

Состав и критические диаметры зарядов из малочувствительных взрывчатых составов

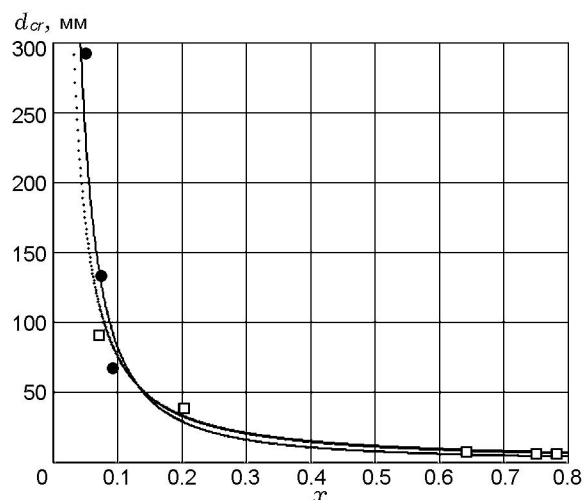
Состав	Компоненты, %				ρ , г/см ³	d_{cr} , мм	Источник
	гексоген	Al	ПХА	связка			
PBXN-105	7	25.8	49.8	17.4	1.65	60 ÷ 90	[9]
PBXN-109	64	20	—	16	1.66	7	
PBXN-110	88	—	—	12	1.67	6.1 ± 0.9	
PBXW-108	85	—	—	15	1.69	10 ± 2	
PBXW-114	78	10	—	12	1.74	6.1 ± 0.8	
PBXW-115	20	43	25	12	1.78	37.1 ± 1.6	
PBXW-122 (НТО-47%)	5	15	20	13	—	178	[2]
ТРТ ААВ 3189	9.2	15	60.8	15	1.725	66	[14]
ТРТ ААВ 3225	7.1	15	62.9	15	1.735	132	
ТРТ ААВ 3267	5.0	15	65	15	1.745	292	

и того же взрывчатого компонента, то соотношения (8) и (9) можно записать в виде

$$d_{cr}(x) = \frac{d_{cr}(x_0)x_0^k}{x^k}, \quad (10)$$

где x_0 — массовая доля взрывчатого компонента в составе, при котором известно значение критического диаметра $d_{cr}(x_0)$; k — показатель, равный 1.17 либо 1.5. Соответствующие экспериментальные данные приведены в табл. 2. Эти же экспериментальные данные представлены на рисунке совместно с зависимостью (10) для обоих значений показателя k . Удовлетворительное описание этой зависимостью экспериментальных данных для малочувствительных взрывчатых составов при содержании взрывчатого компонента $x > 15\%$ достигается при $k = 1.17$, $x_0 = 0.8$ и $d_{cr}(x_0) = 6.5$ мм. Поскольку значению $k = 1.17$ соответствует зависимость (8), то критический диаметр заряда из такого состава оказывается не зависящим от размера частиц ВВ. На самом деле такая зависимость хотя и слабая, но существует [10]. Данное обстоятельство свидетельствует о некоторой ограниченности развитаемого подхода. На это наше внимание было обращено при рецензировании настоящей статьи.

При уменьшении содержания взрывчатого компонента, начиная примерно с 15%, критические диаметры зарядов из малочувствительного состава и ТРТ весьма быстро возрастают, поэтому несколько лучшее согласие экспериментально определенных критических диа-



Зависимость критического диаметра зарядов из малочувствительных взрывчатых составов и смесевых ТРТ на основе гексогена и октогена от содержания взрывчатого компонента:

квадраты — экспериментальные данные для малочувствительных составов [9], кружки — экспериментальные данные для смесевых ТРТ [14], сплошная линия — зависимость (10) при $k = 1.17$, $x_0 = 0.8$, $d_{cr}(x_0) = 6.5$ мм, пунктирная — зависимость (10) при $k = 1.5$, $x_0 = 0.6$, $d_{cr}(x_0) = 5.5$ мм

метров с расчетными достигается при вычислении по формуле (10) при большем значении параметра $k = 1.5$ и $x_0 = 0.6$, $d_{cr}(x_0) = 5.5$ мм. Возможно, это является следствием того, что детонационные волны в таких зарядах облада-

ют сравнительно протяженной зоной химической реакции и начальная скорость разложения ВВ пропорциональна объемной плотности частиц ВВ n_V .

Значению $k = 1.5$ соответствует зависимость (9), согласно которой критический диаметр взрывчатых составов с малым содержанием взрывчатого компонента линейно зависит от размера частиц ВВ. По-видимому, именно этим обстоятельством объясняется тот факт, что критические диаметры зарядов из малочувствительных составов, эквивалентных по составу PBXW-115, но изготовленных в различных странах с использованием «улучшенного» гексогена от различных производителей, колеблются в пределах $37.1 \div 86$ мм [2]. Например, идентичные по компонентному составу PBXW-115, изготавливаемые в США и Австралии, различаются средним размером частиц гексогена и, соответственно, критическими диаметрами: у американского PBXW-115 $\delta = 60$ мкм и $d_{cr} = 37.1 \div 1.6$ мм; у австралийского PBXW-115 $\delta = 105$ мкм и $d_{cr} = 80$ мм [11].

Подводя итоги, можно сказать, что рассмотренный подход позволил, не вдаваясь в детали весьма сложных моделей кинетики разложения гетерогенных ВВ [6, 10], получить зависимости критического диаметра беспористых зарядов из малочувствительных составов от содержания x взрывчатого компонента, удовлетворительно согласующиеся с известными экспериментальными данными. При $x > 0.15$ критический диаметр d_{cr} пропорционален $x^{-1.17}$ и не зависит от размера частиц ВВ δ ; при $x < 0.15$ критический диаметр более сильно зависит от x и пропорционален размеру частиц ВВ: $d_{cr} \sim \delta x^{-1.5}$. Объяснить это можно тем, что начальная скорость разложения малочувствительного состава с большим содержанием взрывчатого компонента после ударно-волнового сжатия пропорциональна плотности частиц ВВ на единицу площади детонационного фронта, тогда как малочувствительные составы и ТРТ с низким содержанием взрывчатого компонента характеризуются сравнительно протяженной зоной химической реакции и начальная скорость разложения ВВ пропорциональна объемной плотности частиц ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильин В. П., Колганов Е. В., Смирнов С. П. и др.** Анализ состояния разработки малочувствительных взрывчатых составов в нашей стране и за рубежом // III межотраслевая науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы и перспективы разработки малочувствительных энергетических материалов и изделий пониженного риска»: Сб. докл. — Дзержинск: ФГУП «ГосНИИ «Кристалл», 2007.
2. **Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А.** Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
3. **Энергетические** конденсированные системы: Краткий энциклопедический справочник / Под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 1999.
4. **Физика** взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. — 2-е изд. — М.: Наука, 1975.
5. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Критический диаметр стационарной детонации высокоплотных ВВ. Влияние оболочки // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 120–123.
6. **Физика** взрыва: В 2 т. / Под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.
7. **Кобылкин И. Ф.** Вычисление критического диаметра детонации зарядов взрывчатого вещества по данным их ударно-волнового инициирования // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 112–115.
8. **Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants** / B. M. Dobratz (Ed.). — Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
9. **Anderson E.** Explosives // Tactical Missile Warheads / J. Carleone (Ed.). — Washington: AIAA, 1993. — P. 81–158.
10. **Khasainov B. A., Ermolaev B. S., Presles H. N., Vidal P.** On the effect of grain size on shock sensitivity of heterogeneous high explosives // Shock Waves. — 1997. — V. 7.
11. **Bocksteiner G., Wolfson M. G., Whelan D. J.** The Critical Diameter, Detonation Velocity and Shock Sensitivity of Australian PBXW-115 // Defense Science and Technology Organization, Australia. — 1994. — DSTO-19950214081.
12. **Caulder S. M., Miller P. J., Kelley J. M.** Effect of particle-size and crystal quality on the critical shock initiation pressure of RDX/HTPB formulations // The 13th Intern. Detonation Symp. — Norfolk, USA, 2006.
13. **Клименко В. Ю., Кривченко А. Л., Кривченко А. А.** Механизм ударно-волнового инициирования гексогена с различными наполнителями // Материалы конф. «Ударные волны в конденсированных средах». — СПб., 2008. — С. 199–208.

14. **Weston A. M., Kinkaid J. F., James E., Lee E. L., Green L. G., Walton J. R.** Correlation of the results initiation test // The 7th Symp. (Intern.) on Detonation. — Washington, 1981.

*Поступила в редакцию 6/X 2008 г.,
в окончательном варианте — 17/III 2009 г.*
