

НИЗКОСКОРОСТНАЯ ДЕТОНАЦИЯ В ТВЕРДЫХ ВВ*Москва*

Явление низкоскоростной детонации (НСД) в твердых порошкообразных ВВ было открыто в 40-х годах нашего столетия, когда в СССР и за границей проводились широкие исследования детонационной способности ВВ. Апин и Боболев [1] наблюдали нестационарное распространение НСД вблизи критических условий существования нормальной детонации. Устойчивый режим НСД в порошкообразном тротиле впервые был описан в работе Джонса, Митчела [2]. Скорость НСД составляла 1—2 км/сек и была в несколько раз ниже скорости нормальной детонации. Детальные исследования низкоскоростной детонации, которую называют также «детонация с малой скоростью», проводятся сравнительно недавно, в течение последних 10—15 лет. В результате этих работ была установлена возможность существования НСД для основных классов ВВ: инициирующих [3, 4], бризантных, смесевых [5, 6], которые находятся в жидком [7—11], пластичном [12, 13] и твердом состояниях, включая порошкообразные [14—21], прессованные [22—26] и литые [27—29] системы.

В настоящем докладе анализируется низкоскоростная детонация в твердых индивидуальных ВВ бризантного типа, специфической особенностью которых является разрывный характер зависимости скорости детонации от диаметра, параметров оболочки заряда и условий инициирования. Не рассматриваются вследствие ограниченности объема доклада смесевые ВВ, а также слабые ВВ с низкой теплотой взрыва (например, ВВ + инертная добавка, окислители типа перхлората аммония и т. п.).

Явления анализируются с позиций теории неидеальной детонации. В ранних исследованиях, подробно описанных в монографиях Кука [30], Тэйлора [31], наблюдали, как правило, нестационарные режимы НСД (затухающие или ускоряющиеся). Сейчас убедительно показано, что низкоскоростная детонация является одной из промежуточных стадий перехода нормального горения пористых систем в нормальную высокоскоростную детонацию (НД). Естественно, возникал вопрос, возможна ли стационарная, устойчивая НСД, каковы закономерности и особенности ее распространения? Необходимо было выяснить механизм стабилизации НСД, исследовать структуру волны, механизм инициирования реакции, разработать математические модели.

На решении именно этих проблем было сосредоточено внимание исследователей в последние годы. Основные результаты, полученные к настоящему времени, рассмотрим на примере зарядов ВВ с высокой и низкой пористостью.

Наиболее подробно изучали распространение НСД в высокопористых порошкообразных зарядах тротила, тетрила, ТЭНа и гексогена. ВВ заключали в малопрочные оболочки из бумаги, целлофана и инициировали слабой ударной волной. В работах [2, 16—19] было показано, что при строго определенных значениях размера частиц ВВ и диаметра заряда распространение НСД осуществляется с постоянной скоростью на длинах, равных 30—50 диаметрам заряда (абсолютная длина составляла до 100 см). Процесс весьма чувствителен к изменениям условий опыта.

Представляет интерес зависимость скорости детонации от диаметра заряда $D(d_3)$. В схематическом виде она приведена на рис. 1, а, а экспериментальные данные Апина, Парфенова [16] для тетрила представлены на рис. 1, б. Здесь нижняя ветвь соответствует низкоскоростной, верхняя — высокоскоростной детонации. Обращает на себя внимание прежде всего разрывный характер зависимости $D(d_3)$. При диаметре заряда, превышающем предельное значение (d'), существование НСД невозможно, и распространяется

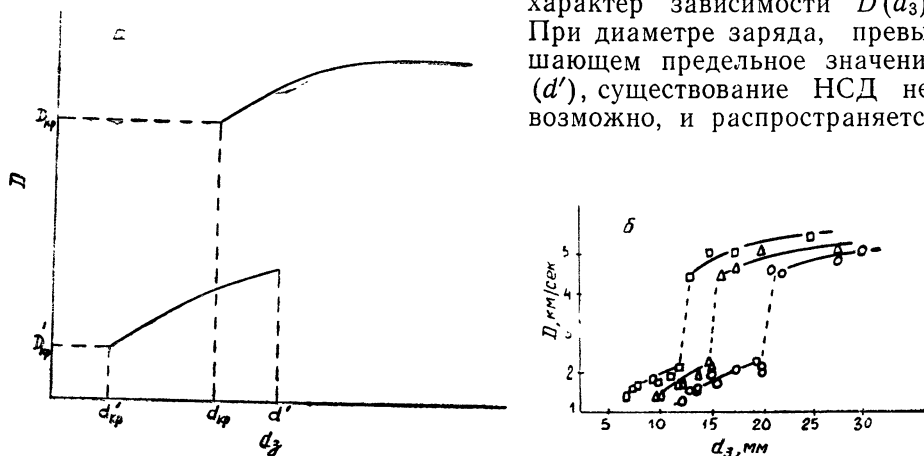


Рис. 1. Зависимость скорости детонации порошкообразных ВВ от диаметра заряда: а — схема; б — эксперимент [16] (тетрил, $\rho_3=0,92$ г/см³, начальный размер частиц: 1 — $d_0=0,5$; 2 — $0,8$; 3 — $1,3$ мм)

только нормальная детонация. На рис. 1, а $d'_{кр}$, $d_{кр}$ и $D'_{кр}$, $D_{кр}$ — соответственно критические диаметры, скорости низкоскоростной и нормальной детонаций. Обычно НСД в порошках наблюдается при диаметрах заряда, близких к критическому диаметру нормальной детонации $d_{кр}$. При этом нижний, критический диаметр НСД $d'_{кр} \leq d_{кр}$, а верхний, предельный диаметр НСД $d' \geq d_{кр}$. Область существования НСД по диаметрам ограничена $d'_{кр} < d_3 \leq d'$. Исследования показали, что $d'_{кр}$ и d' прямо пропорциональны начальному размеру частиц ВВ, а максимальная скорость НСД при $d_3 = d'$ практически не зависит от дисперсности ВВ и составляет 2000—2300 м/сек [17]. Скорость НСД возрастает с увеличением диаметра заряда и уменьшением размера частиц. В отличие от индивидуальных ВВ зависимость $D(d_3)$ для смесевых ВВ (ВВ + окислитель) является плавной [6].

Систематические исследования распространения установившейся низкоскоростной детонации в малопористом (2,5%) прессованном тэне проведены в работах [22—24]. Было показано, что на длинах 30—50 диаметров заряда процесс распространяется с постоянной скоростью, если ВВ заключено в деформируемую оболочку из плексигласа, стали и других материалов. Инициирование осуществлялось слабой ударной волной или путем поджигания у закрытого конца. Скорость НСД регулировали в основном изменением толщины стенки или материала оболочки заряда.

На рис. 2 представлена зависимость скорости детонации ТЭНа от толщины Δ стальной оболочки, нижняя кривая отвечает низкоскоростной, верхняя — высокоскоростной детонации, идеальная скорость $D = 8500$ м/сек.

По данным Клафама [31] аналогичный вид имеет зависимость скорости НСД от диаметра заряда для жидкого нитроглицерина с пузырьками воздуха. Из рис. 2 видно, что скорость НСД непрерывно возрастает с увеличением толщины оболочки от 1300 до 3300 м/сек. Интересная особенность НСД в высокоплотных зарядах состоит в том, что ее скорость может быть меньше продольной скорости звука в исходном ВВ

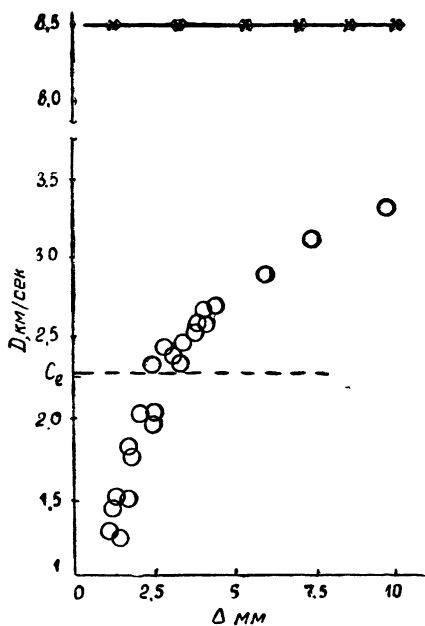


Рис. 2. Экспериментальная зависимость скорости детонации прессованного ВВ от толщины стальной оболочки [22, 23] (ТЭН, $\rho_3 = 1,73$ г/см³, $d_0 = 0,5$, $d_3 = 5$ мм)

(для ТЭНа с плотностью $\rho_3 = 1,73$ г/см³ измеренная скорость звука $c_e = 2250$ м/сек). Минимальная скорость НСД в зарядах ТЭНа, окруженных малопрочной оболочкой из плексигласа, составляет всего 800—1000 м/сек. Процесс с данной или более высокой скоростью передавался через металлические пластины, полностью разделяющие заряд, что свидетельствует о волновой природе его. Естественно, что объяснение дозвуковых режимов с позиций теории неидеальной детонации вызвало серьезные трудности. Возникал вопрос, можно ли называть детонационным дозвуковой (относительно невозмущенного ВВ) процесс?

Таким образом, как следует из рис. 2, реально наблюдается дозвуковое, звуковое и сверхзвуковое распространение НСД (звуковая линия показана пунктиром).

Необходимо отметить еще две особенности высокоплотных систем: а) НСД распространяется в зарядах ТЭНа, диаметр которых в десятки раз превышает критический диаметр нормальной детонации, и, следовательно, существует значительная область диаметров, где в зависимости от мощности инициирования наблюдается как низкая, так и высокая скорости детонации; б) критическая скорость НСД существенно, почти в десять раз, ниже идеальной скорости детонации (соответственно 800 и 8500 м/сек), что свидетельствует о малом тепловыделении в волне НСД.

В отличие от порошкообразных ВВ изменение начального размера частиц в прессованном заряде оказывает слабое влияние. Так, например, уменьшение размера частиц с 500 до 20 мк снижает скорость НСД от 2250 до 2000 м/сек.

Проведенные исследования выявили существенное влияние на возможность и скорость распространения НСД прочности и массы оболочки, окружающей заряд ВВ сравнительно небольшого диаметра. Роль оболочки состоит в том, что ее деформация (расширение) стабилизирует режим НСД и поддерживает давление в волне на определенном уровне. Толщина оболочки позволяет регулировать давление в волне (p_*) и, следовательно, — скорость процесса, что дало возможность получить для ТЭНа зависимость $D(p_*)$ скорости НСД от давления. В отличие от жидких ВВ при распространении НСД в твердых ВВ определяющей является именно волна сжатия в исходном веществе. Возмущения, распространяющиеся по оболочке, не играют существенной роли, что было подтверждено специальными опытами. Устойчивая низкоскоростная детонация наблюдалась, если заряд содержал небольшую (\sim нескольких процентов) пористость.

В работах [28, 29] исследовалось распространение НСД в литом тротиле. Показано, что на длинах до 50 см скорость НСД была постоянной (1800—2000 м/сек) и близкой к скорости звука. По-видимому, характер пористости (открытая, закрытая) играет несущественную роль в процессе распространения НСД.

Несмотря на имеющиеся различия в закономерностях распространения НСД в порошкообразных и высокоплотных ВВ, имеется ряд общих свойств, к числу которых относятся: а) разрывный характер зависимости скорости детонации от диаметра заряда и толщины оболочки; б) существование критического и предельного диаметров; в) низкое тепловыделение в волне НСД (для порошков — согласно калориметрическим измерениям, дающим завышенное — вследствие неполной закалки продуктов — значение, составляет 20—35% [17], для высокоплотных — в соответствии с расчетом [32], выделяется порядка процента от полной энергии); г) НСД инициируется и поддерживается слабой волной сжатия, амплитуда которой значительно ниже критического давления инициирования нормальной детонации (таблица).

В таблице для некоторых ВВ приведены критические (минимальные) давления инициирования низкоскоростной (p_{min}) и высокоскоростной ($p_{кр}$) детонации; в последнем столбце приведено полученное электромагнитным методом максимальное давление (p_*) в волне НСД.

НСД инициируется ударными волнами с амплитудой в несколько килобар, при этом величина p_{min} в отличие от $p_{кр}$ слабо зависит от пористости заряда. Значения критических давлений определяют область существования НСД: $p_{min} \leq p_* \leq p_{кр}$ [26]. Отметим, что давления в волне НСД для зарядов с высокой и низкой пористостью являются близкими.

Результаты измерения структуры волны НСД, выполненного электромагнитным методом, представляют особый интерес. В [18, 20] было пока-

зано, что для НСД в порошкообразном ВВ профиль массовой скорости не содержит хипика и имеет треугольную форму. Аналогичный профиль фиксируется при распространении детонации в сильно разбавленных инертной добавкой смесях ВВ.

ВВ	ρ , г/см ³ (начальный размер частиц, мм)	d_3 , мм (материал оболочки)	P_{min} , кбар	$P_{кр}$, кбар	Параметры волны НСД	
					D , км/сек	p_* , кбар
Тротил	0,96 (0,4—0,8)	28 (целлофан)			1,67	7,5
	1,0 (0,5—1)	38		27	1,14	4,7
Тротил литон	1,59	10—15 (сталь)	4	~40	2	7
ТЭН прессо- ванный	1,42 (0,5)	5 (плексиглас)	2,5	5,5	1,0	
	1,73 (0,5)	5 (сталь)	3	17	1,3	5
	1,73 (0,5)	5 (сталь)	3	17	2,7	15

Примечание. При определении критических давлений применяли главным образом активный заряд тротила+NaCl с различным содержанием компонентов, плотностью 1,36 г/см³ и диаметром 40 мм. Ударная волна вводилась в исследуемое ВВ через медную преграду толщиной 5—10 мм.

Исследования структуры волны сжатия в высокоплотных ($\rho_3 = 1,60$ г/см³) зарядах прессованного тротила в интервале давлений 3—20 кбар выполнены в [23]. Эксперименты проводили в условиях, когда заряд ВВ был без оболочки и нагружался плоской ударной волной определенной амплитуды. Установлена важная роль упруго-пластического перехода в ВВ и показано, что при давлении ниже некоторого критического (для тротила — 7 кбар) ударная волна расщепляется на две: упругую, движущуюся со скоростью, равной продольной скорости звука c_l и пластическую, распространяющуюся с меньшей (дозвуковой) скоростью. Упруго-пластический переход, возникающий вследствие излома ударной адиабаты, имеет место, когда давление в волне превышает предел текучести слоя ВВ, который составляет 0,5—3 кбар. Химическая реакция инициируется в пластической волне. С указанных позиций было дано физическое объяснение возможности существования дозвуковых режимов НСД. Эти представления были использованы в работах [23, 34], в которых было установлено, что дозвуковой режим является сверхзвуковым относительно измененного состояния за упругой волной, и на этом основании его можно классифицировать как детонационный. Кузнецов [35] показал, каким образом стационарная детонационная волна с малым тепловыделением непрерывно излучает упругий предвестник, и определил минимальное энергосодержание в волне, при котором возможен этот гидродинамический комплекс. Теоретически получено значение минимальной скорости НСД, равное $D_{min} = (0,5—0,8) c_l$ (эксперимент дает $D_{min} = 0,35 c_l$).

Сверхзвуковые режимы НСД поддерживаются ударной волной, и расщепление волны отсутствует.

Заканчивая анализ экспериментальных результатов, остановимся на вопросе о стационарности низкоскоростных режимов детонации. Большинство исследователей считают, что реально существуют условия, изложенные выше, при которых распространение НСД является стационар-

ным. Подтверждением этому являются: а) постоянство скорости по длине заряда на базах до 30—50 диаметров (в экспериментах максимальная длина заряда твердых ВВ составляла 100 см, взрывчатой желатины — до 500 см); б) устойчивость НСД к изменению амплитуды инициирующей ударной волны, если давление в ней меньше критического $p_{кр}$; в) в порошкообразном ВВ постоянной скорости НСД соответствуют неизменный по длине заряда профиль массовой скорости $u(t)$, а в случае высокоплотных зарядов — постоянная деформация внутреннего канала металлической оболочки, указывающая на постоянство давления. Вместе с тем, в работе Шведова, Колдунова, Дремина [20], которые исследовали НСД в насыпном тротиле, отмечалось, что процесс, имеющий постоянную скорость и профиль волны на базе, равной 10—15 диаметрам, затем внезапно ускорялся (до нормальной детонации) или затухал на оставшейся части заряда. На основании этого авторы высказывают сомнение относительно возможности стационарного распространения НСД в порошкообразных ВВ. Вместе с тем отмечается, что электромагнитный датчик не фиксировал каких-либо вторичных волн сжатия или разрежения, вызывающих разрушение волны НСД. Не исключено, что отмеченный нестационарный эффект есть результат не совсем удачного выбора объекта исследования, так как для насыпного тротила характерна весьма узкая область, в которой возможно стационарное распространение НСД.

Рассмотрим состояние теоретических работ по низкоскоростной детонации и существующие точки зрения. НСД описывается теорией неидеальной детонации. В работах Кузнецова [35, 36] показана неоднозначность детонационных режимов в ограниченной среде и теоретически доказана возможность существования динамически устойчивых детонационных комплексов с низкой скоростью распространения, для которых характерно малое тепловыделение в зоне реакции (до плоскости Чепмена—Жуге).

Широко распространенная сейчас точка зрения состоит в том, что стационарные режимы НСД существуют за счет совместного действия боковой волны разрежения и немонотонности тепловыделения в зоне реакции. Указанные факторы определяют механизм стабилизации НСД.

В литературе имеются единичные работы по расчету конкретных моделей НСД. Трудности в применении общей теории неидеальной детонации состоят в следующем: а) отсутствуют кинетические модели инициирования первичной реакции в локальных очагах — «горячих» точках; б) вследствие невысокого давления и малого тепловыделения в волне НСД необходимо учитывать сложный двухфазный характер среды, обмен энергией и импульсом в зоне реакции, эффект расщепления ударной волны и гидродинамику широкой зоны догорания.

Вкратце остановимся лишь на двух моделях, опубликованных в последнее время. Модель кинетической решетки Чейкена [37], развитая применительно к гетерогенным системам, учитывает боковую волну разрежения, приход которой гасит химическую реакцию, и формальную кинетику, не связанную с каким-либо конкретным механизмом создания «горячих» точек. Двухфазные эффекты не рассматриваются, поэтому результаты расчета носят качественный характер. Получено, что скорость НСД слабо зависит от диаметра, плотности заряда и скорости химической реакции. Модель не дает пределов НСД.

Более совершенная модель [32], описывающая распространение НСД в высокоплотных зарядах, окруженных деформируемой оболочкой учитывает двухфазность среды (используется составное уравнение состояния отдельно для κ -фазы и газа) и расщепление ударной волны.

Рассматривалось квазиодномерное течение двухфазной реагирующей односкоростной среды за фронтом волны сжатия. Модель предсказывает

существование верхнего и нижнего пределов НСД и дает сильную зависимость скорости НСД от скорости химической реакции и параметров оболочки (толщины, диаметра и материала). Рассчитаны также давления во фронте волны и в плоскости Чепмена—Жуге, тепловыделение в зоне реакции и ширина детонационного комплекса. Наблюдается удовлетворительное согласие расчёта с экспериментом по виду зависимости скорости НСД в ТЭНе от толщины стальной оболочки, по уровню скорости и давления. Оказалось, что при скорости детонации $D \approx 2,5$ км/сек в волне сгорает всего около 1% ВВ, расстояние от волны сжатия до плоскости Чепмена—Жуге составляет около 7 мм. Модель позволяет оценивать на основании сравнения с экспериментом удельную поверхность горения, что в дальнейшем может быть использовано при исследовании инициирования химической реакции волнами сжатия.

К сожалению, в литературе практически отсутствуют данные о механизме инициирования реакции в волне НСД¹. Поскольку объемный разогрев ВВ в столь слабых волнах ничтожен (не превышает нескольких десятков градусов), то все исследователи считают, что реакция инициируется в отдельных «горячих» точках, а основная часть ВВ в зоне реакции выполняет роль инертной добавки. Это подтверждается экспериментами, в которых наблюдалось очаговое разложение ВВ, сохраненного в специальных капсулах после воздействия ударных волн докритической интенсивности ($p < p_{min}$). Рассматриваются два возможных механизма образования «горячих» точек, возникающих при схлопывании пор: а) адиабатическое сжатие газа или паров ВВ, б) разогрев вещества в местах контакта зерен при пластическом течении в волне. В этом отношении представляет интерес работа [38], в которой на кристаллы инициирующих ВВ, ТЭНа наносили газовые пузырьки определенного размера (от 50 мк до 1 мм), которые быстро схлопывались при прохождении ударной волны с амплитудой 1 кбар. По мнению авторов, адиабатический разогрев газового пузырька был основной причиной инициирования реакций в этом случае. Оценки показывают, что оба механизма в состоянии обеспечить за время порядка микросекунд быстрое тепловыделение, достаточное для поддержания слабой волны НСД. В насыпных ВВ инициирование облегчается вследствие большой сжимаемости порошка. В высокоплотном ТЭНе задержка инициирования реакции НСД составляет примерно 10 мксек при воздействии ударных волн с амплитудой в несколько килобар, а размер «горячей» точки, рассчитанный по теории очагового теплового взрыва, равен 10^{-4} см [15]. Развитие очагов осуществляется, по-видимому, в форме поверхностного взрывного горения. Действительно, покрытие кристаллов ВВ тонкими (несколько микрон) пленками флегматизатора приводит к существенному уменьшению скорости НСД порошкообразных и высокоплотных зарядов. С указанных позиций находит свое естественное объяснение и тот факт, что критический и предельный диаметры НСД в порошкообразных ВВ пропорциональны начальному размеру частиц [6, 17].

Представления о развитии процесса горения из очага после инициирования реакции также пока носят слишком формальный характер и нуждаются в дальнейшей теоретической и экспериментальной проверке. По нашему мнению, на этой стадии реакции может возникать существенная немонотонность тепловыделения за счет «внутренней» разгрузки очагов вследствие интенсивных тепловых и газодинамических потерь при развитии очага.

В высокоплотном заряде роль такой разгрузки могут выполнять возникающие при разрушении очага избыточным давлением процессы тре-

¹ Определенная информация по этому вопросу может быть получена из обработки экспериментов по инициированию детонации слабыми (до 10—20 кбар) ударными волнами.

щинообразования и раскрытия не реагирующих пор в «холодном» ВВ, окружающем очаг. Истечение горячих газов из очага в образовавшиеся трещины приводит к снижению давления и температуры в нем, следствием чего является временное «пригасание» очага.

В данной статье не рассматривается вопрос о переходе НСД в нормальную высокоскоростную детонацию. Отметим только, что в порошкообразном ВВ такой переход связывают с интенсивным дроблением кристаллов при достижении некоторого критического давления в волне и с увеличением поверхности горения [6], а в высокоплотных ВВ — с существенным влиянием процесса догорания взвеси (особенно в прочных оболочках) и с образованием вторичных волн сжатия [15, 32, 39].

В заключение необходимо отметить, что имеющиеся данные дают достаточно полное представление о физической природе низкоскоростной детонации. Сейчас необходима разработка количественного аппарата для всестороннего описания процесса. В этой связи представляется целесообразным дальнейшие исследования НСД проводить в следующих направлениях:

1. Создание комплексных методов исследования структуры волны, включающих измерение скорости, размера характерных зон, распределения давления и плотности.

2. Разработка механизма и теории инициирования реакции.

3. Анализ влияния зоны догорания на характер течения в волне с целью решения основного вопроса об устойчивости НСД и зависимости ее от условий эксперимента.

Интерес для исследователей представляют два аспекта, состоящие в том, что режим НСД можно заставить стабилизироваться, а данный процесс реализовать в неразрушающихся оболочках в силу достаточно низкого уровня давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Апин, В. К. Боболев. «Докл. АН СССР», 1947, 58, стр. 241.
2. E. Jones, D. Mitchell. "Nature", 1948, 161, 98, p. 4081.
3. R. M. Stresan. "Phys. Rev.", 1958, 27, p. 1.
4. M. M. Chandri, I. E. Field. V Symposium (International) on Detonation, 1970.
5. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников, А. Я. Апин. В сб.: «Взрывное дело», М., «Недра», 1966, № 60/17, стр. 29.
6. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников. «Физ. гор. и взрыва», 1969, 3.
7. Ю. Б. Харитон, С. Б. Ратнер. «Докл. АН СССР», 1943, 41, стр. 307.
8. Р. Х. Курбангалина. «Ж. физ. химии», 1948, 22, 1, стр. 49.
9. И. М. Воскобойников, А. В. Дубовик, В. К. Боболев. «Докл. АН СССР», 1965, 161, 52, стр. 1152.
10. R. W. Watson, C. R. Summers, F. C. Gibson, R. W. Van Dolan. IV Symposium (International) on Detonation, USA, 1965, p. 117.
11. А. В. Дубовик. Диссертация. ИХФ АН СССР, 1966.
12. К. Юхансон, П. Петерсон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973, стр. 64—81.
13. M. L. Selberg, T. Sjolín. "Explosivstoffe", 1961, 9, S. 150.
14. Ф. Боуден, А. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких ВВ. М., ИИЛ, 1955.
15. А. Я. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов, С. В. Чуйко. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука», 1973, стр. 143—164.
16. А. А. Парфенов, А. Я. Апин. «Научн.-техн. пробл. гор. и взрыва», 1965, 1, стр. 109.
17. А. К. Парфенов. Диссертация. ИХФ АН СССР, 1967.
18. А. А. Дубовик, В. К. Боболев. В сб.: «Взрывное дело», М., «Недра», 1967, № 63/20, стр. 72.
19. А. В. Дубовик, А. А. Денисаев, В. К. Боболев. «Физ. гор. и взрыва», 1973, 9, 3, стр. 428.
20. К. К. Шведов, С. А. Колдунов, А. Н. Дремин. «Физ. гор. и взрыва», 1973, 9, 3, стр. 424.
21. А. А. Соколов, Ю. Н. Аксенов. В сб.: «Взрывное дело», М., Госгортехиздат, 1963, № 52/9, стр. 201.

22. А. В. Обменин, В. А. Балыков, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. «Физ. гор. и взрыва», 1970, 4, стр. 571.
23. А. А. Сулимов, А. В. Обменин, А. И. Коротков, П. И. Шушляпин. «Горение и взрыв». Материалы Третьего всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. М., «Наука», 1972, стр. 464.
24. А. В. Обменин, А. И. Коротков, А. А. Сулимов, В. Ф. Дубовицкий. «Физ. гор. и взрыва», 1969, 6, стр. 461.
25. В. К. Боболев, А. В. Дубовик, И. А. Карпунин, В. В. Рыбаков. «Физ. гор. и взрыва», 1969, 3, стр. 331.
26. А. А. Sulimov, B. S. Ermolaev et. al Preprints of VI Symposium (International) on Detonation, USA, 1976.
27. D Price, I F Wehner. "Combustion and Flame", 1965, 9, p. 73.
28. И. В. Бабайцев, Б. Н. Кондриков, З. В. Паукова, В. Ф. Тышевич. «Физ. гор. и взрыва», 1969, 3, стр. 326.
29. И. В. Бабайцев, Б. Н. Кондриков, В. Ф. Тышевич. В сб.: «Взрывное дело», 1970, № 68/25, стр. 215.
30. M. A Cook. The Science of High Explosives. N. Y., Reinhold Publishing Corp., 1958.
31. I Taylor. Detonation in Condensed Explosives. Oxford, Clarendon Press., 1952.
32. В. С. Ермолаев, В. А. Хасанов, А. А. Борисов, А. И. Коротков. "Astronaut Acta", 1976, 3, No 11/12.
33. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. В сб.: «Взрывное дело», М., «Недра», 1967, № 63/20, стр. 37.
34. Б. С. Ермолаев, В. А. Хасанов и др. «Физ. гор. и взрыва», 11, 2, стр. 325.
35. Н. М. Кузнецов. «Ж. прикл. механ. и техн. физ.», 1975, № 1, стр. 69.
36. Н. М. Кузнецов. «Ж. прикл. механ. и техн. физ.», 1968, № 1, стр. 45.
37. R. F. Chaiken, T. C. Edwards. Preprints of VI Symposium (International) on Detonation, USA, 1976, p. 347.
38. M. M. Chandri, I. E. Field. "Proc Royal Soc.", 1974, 340, p. 113.
39. R. Bernecker, D. Price. "Combustion and Flame", 1974, 22, 2, p. 161.

УДК 534.222