

УДК 662.215

ПЕРЕСЖАТИЕ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИИ В ПЛАСТИФИЦИРОВАННОМ ТАТБ

В. И. Таржанов, Д. В. Петров, А. Ю. Гармашев, Д. П. Кучко,
А. В. Воробьёв, М. А. Ральников, Д. С. Боярников, **Ю. А. Аминов**,
Ю. Р. Никитенко

РФЯЦ, ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, v.i.tarzhanov@vniitf.ru

Исследовалось пересжатие детонации при ее схождении в полусферическом заряде пластифицированного триаминотринитробензола с наружным и внутренним радиусами 75 и 20 мм после его инициирования по внешней поверхности. Проведено численное моделирование эксперимента с учетом кинетики превращения взрывчатого вещества в продукты взрыва. Экспериментально-расчетным путем получены параметры пересжатой детонации в исследуемом взрывчатом веществе на диагностируемом радиусе заряда 20 мм: в максимуме профиля давление 70 ГПа, скорость фронта 9.45 км/с, массовая скорость за фронтом 3.88 км/с. Достигнутое в рассматриваемом эксперименте пересжатие — 2.3. Найдена точка пересечения адиабат «нереагирующего» взрывчатого вещества и его продуктов взрыва, которая реализуется на радиусе 31 мм при давлении 52 ГПа. Соответствующие скорость фронта и массовая скорость за ним в этой точке имеют значения 8.55 и 3.18 км/с. Полученные параметры в точке пересечения адиабат сопоставлены с имеющимися литературными данными для триаминотринитробензола и составов на его основе. Обнаружен достаточно большой разброс данных. Высказаны предположения о причинах разброса.

Ключевые слова: взрывчатое вещество (ВВ), пластифицированный ТАТБ, детонация, химпик (пик Неймана), лазерно-интерферометрическая диагностика.

DOI 10.15372/FGV20220316

ВВЕДЕНИЕ

Триаминотринитробензол (ТАТБ) и взрывчатые составы на его основе интенсивно исследуются уже четыре десятилетия. Это связано с их низкой чувствительностью и пожаростойкостью, а также с рядом особенностей эволюции детонационной волны после инициирования [1–9]. Большое внимание уделяется расчетно-теоретическому моделированию детонации как в нормальном режиме, так и в режиме пересжатия [10–12].

Термин «пересжатая детонация» введен в России в 1947 г. Я. Б. Зельдовичем в статье [13], написанной в соавторстве с Б. В. Айвазовым. В статье были описаны эксперименты, впервые подтвердившие существование пересжатой детонации. В 1948 г. Е. И. Забабахин ввел в рассмотрение принцип многокаскадного разгона пластин, в котором применялась пере-

сжатая детонация [14]. В 1951 г. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и М. И. Бражник провели исследования на каскадном полусферическом измерительном заряде с пересжатием детонации [15, 16]. В книге [17] Я. Б. Зельдович уже широко использует этот термин.

Пересжатая детонация обладает рядом специфических особенностей. Так, в ней нарушается условие Жуге, и звук в продуктах пересжатой детонации может догонять ее фронт [14]. Превышение амплитуды химпика над давлением в конце зоны реакции снижается с ростом степени пересжатия [18]. Интересно, что это снижение не является монотонным с асимптотикой при бесконечном пересжатии. Химпик исчезает гораздо раньше из-за так называемого «пересечения» ударной адиабатой «инертного» взрывчатого вещества (ВВ) детонационной адиабаты продуктов взрыва (ПВ) [19, 20]. Но самое главное — экспериментальные данные по пересжатой детонации позволяют значимо уточнять уравнение состояния ПВ за счет расширения диапазона их исследования по температуре и давлению.

© Таржанов В. И., Петров Д. В., Гармашев А. Ю.,
Кучко Д. П., Воробьёв А. В., Ральников М. А.,
Боярников Д. С., Аминов Ю. А., Никитенко Ю. Р.,
2022.

Приближенная теория сходящейся детонационной волны, по свидетельству Е. И. Забабахина [14], была разработана Я. Б. Зельдовичем в 1948 г. Из теории следовало, что давление на фронте такой волны с течением времени возрастает, т. е. детонация сама собой становится пересжатой. Это подтверждалось и проводившимися параллельно под руководством К. А. Семендяева полными численными расчетами схождения детонационной волны. В настоящее время возможно точное численное моделирование с включением самых сложных кинетик реакции превращения ВВ в ПВ, обеспечивающих описание зоны химика.

В связи с отсутствием в литературе экспериментальных работ с диагностикой сходящейся детонации в конденсированных ВВ во ВНИИТФ был проведен эксперимент с лазерно-интерферометрической регистрацией профиля сходящейся пересжатой детонации в пластифицированном ТАТБ (ПСТ), исследовавшемся ранее [12], а также было выполнено прогнозное численное моделирование эксперимента.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментального узла представлена на рис. 1.

По заряду ПСТ 1 с наружным и внутренним радиусами 75 и 20 мм после инициирования его по всей внешней поверхности распространяется сходящаяся детонационная волна. Временной профиль волны регистрируется на контактной поверхности с окном 2.

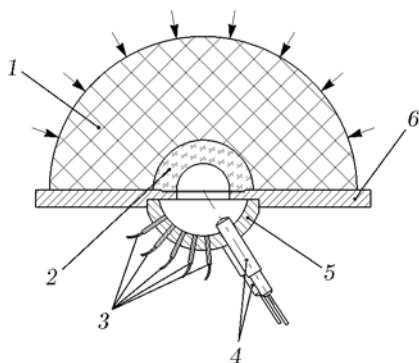


Рис. 1. Схема экспериментального узла:

1 — заряд ПСТ, 2 — окно из LiF, 3 — коллиматоры ЛГМ, 4 — оптические головки, 5 — держатель оптических головок и коллиматоров, 6 — опорная плита; стрелки — направления действия системы инициирования

В качестве материала окна применялся монокристаллический фтористый литий Z-среза. Окно изготовлено так, чтобы ось симметрии совпадала с кристаллографической осью $\{100\}$, а центр окна совпадал с центром заряда ПСТ. Поверхность LiF, обращенная к ВВ, имела термовакuumное покрытие из алюминия толщиной 2.5 мкм. Микрозазор (≈ 5 мкм) между внутренней поверхностью ВВ и покрытием на окне из LiF заполнялся глицерином.

Зондирование контактной поверхности ВВ—LiF¹ и получение оптической информации с доплеровским сдвигом частоты осуществлялись, во-первых, в двух точках с применением «совмещенных» оптических головок, в которых находились каналы лазерно-интерферометрической методики Фабри — Перо [21] и лазерно-гетеродинной методики² [22]. Полярные углы установки головок 33° и 40° . Во-вторых, зондирование и регистрация информации проводились с помощью 11 оптических коллиматоров ($\varnothing 3.2$ мм) лазерно-гетеродинной методики, установленных в держателе 5 (см. рис. 1) в диапазоне полярных углов $7 \div 55^\circ$ и азимутальных углов $0 \div 335^\circ$. Все точки, в которых регистрировали информацию, находились вне зоны торцевой разгрузки детонационного фронта. Временное разрешение методик (с учетом алгоритма обработки регистрограмм) — 3 нс. Разрешение по скорости — 10 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Детонационные профили, полученные обработкой осциллограмм ЛГМ, показаны на рис. 2. Профили приведены к одному произвольно выбранному начальному моменту времени для удобства сравнения их форм в разных диагностируемых точках поверхности ВВ—LiF.

Видно, что характер профилей во всех диагностируемых точках одинаков: после достижения в прифронтной зоне максимума скорость контактной поверхности ВВ—LiF плавно снижается. Причина снижения — расходимость ПВ, разгружающихся за фронтом в телесный угол 2π . Различия значений скорости

¹Для краткости будем говорить о контактной поверхности ВВ—LiF, пренебрегая присутствием на поверхности LiF тонкого покрытия из алюминия.

²За рубежом — PDV (photonic Doppler velocimetry) [22].

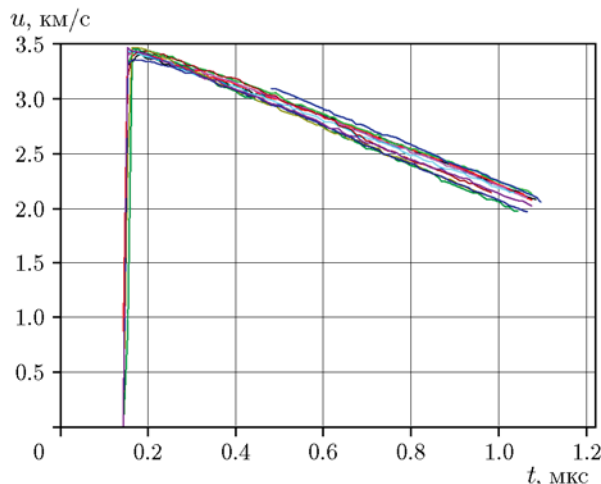


Рис. 2. Одиннадцать детонационных профилей, полученных с помощью ЛГМ в разных точках поверхности ВВ—LiF

в разных профилях на всей длине записи не превышает 200 м/с, т. е. около 10 % от номинала. В прифронтовой части записи различие скоростей около 5 %. В реальном времени на профилях зарегистрирована разновременность выхода диагностируемых участков детонационного фронта на контактную поверхность с LiF — 80 нс. Данная разновременность, зафиксированная на радиусе 20 мм, при имевшейся асимметрии инициирующей ударной волны на наружной поверхности заряда ПСТ 0.18 мкс свидетельствует о высокой устойчивости сходящегося детонационного фронта.

На рис. 3 приведены детонационные профили, полученные на диагностируемой поверхности LiF с применением методики Фабри — Перо и лазерно-гетеродинной методики. Видно хорошее согласие данных.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перед проведением описываемого эксперимента было выполнено его прогнозное численное моделирование. Расчеты проводились в одномерной постановке с учетом кинетики преращения ВВ—ПВ по [10].

На рис. 4 расчетный детонационный профиль показан в совмещении с осредненным по всем каналам регистрации экспериментальным профилем. Максимальное значение скорости $u(t)_{\text{LiFmax}}$ на экспериментальном профиле — 3.40 ± 0.02 км/с. Практически линейный

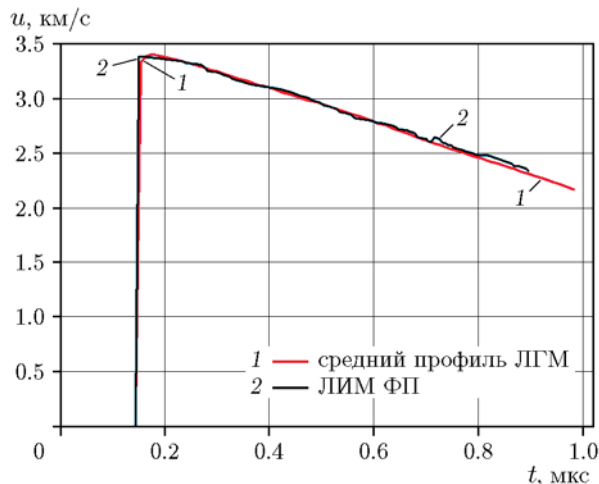


Рис. 3. Профили скорости, полученные при использовании лазерно-интерферометрической методики Фабри — Перо (ЛИМ ФП) и лазерно-гетеродинной методики (ЛГМ)

спад скорости за фронтом характеризуется величиной 2.6 км/(с · мкс).

На рис. 4 видно, что формы расчетного и экспериментального профилей несколько различаются. Отличие скоростей в передней части — около 100 м/с, в хвостовой части — около 200 м/с. Отличается и наклон ниспадающих участков. Причины отличий связаны в первом случае с не вполне адекватным описанием ре-

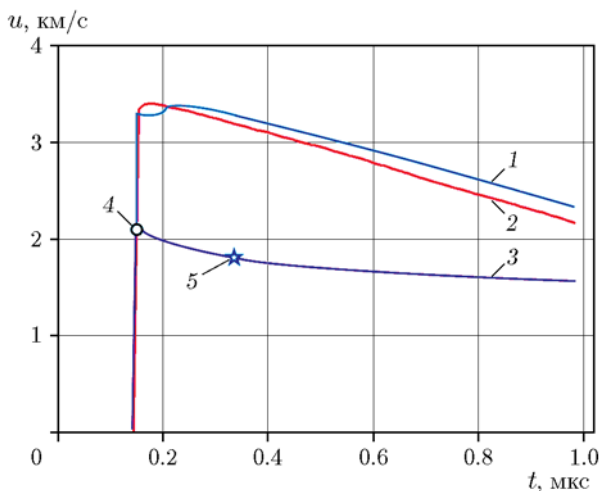


Рис. 4. Расчетный профиль скорости на контактной границе ВВ—LiF в совмещении с осредненным по всем каналам регистрации экспериментальным профилем:

1 — расчет, 2 — эксперимент, 3 — профиль нормальной детонации в ПСТ, 4 и 5 — состояния Неймана и Жуге соответственно

альной кинетики разложения ВВ кинетической моделью, используемой в расчетах, а во втором — с недостаточной детальностью описания применяемой системы инициирования заряда ПСТ. На обоих сравниваемых профилях налицо отсутствие химпика.

На рис. 4 приведены также профиль нормальной детонации в ПСТ, зарегистрированный на контактной границе ВВ—LiF, и значения скорости $u(t)$, соответствующие состоянию Неймана в химпике — 2.08 км/с [23, 24] и в точке Жуге — 1.78 км/с. Видно, что эти значения расположены существенно ниже зарегистрированных в сходящейся пересжатой детонации.

На рис. 5 показана эволюция расчетных профилей детонационной волны непосредственно в ПСТ в моменты выхода ее на разные радиусы заряда вплоть до диагностируемого радиуса 20 мм. На радиусе 75 мм приведен входящий в ВВ импульс инициирования. Видно, что давление на вершине химпика при движении к центру системы постепенно увеличивается, приближаясь к точке пересечения с кривой эволюции максимальных состояний ПВ. Далее наблюдается вырождение (исчезновение) химпика и в конечном итоге его «переворачивание» на диагностируемом в эксперименте радиусе

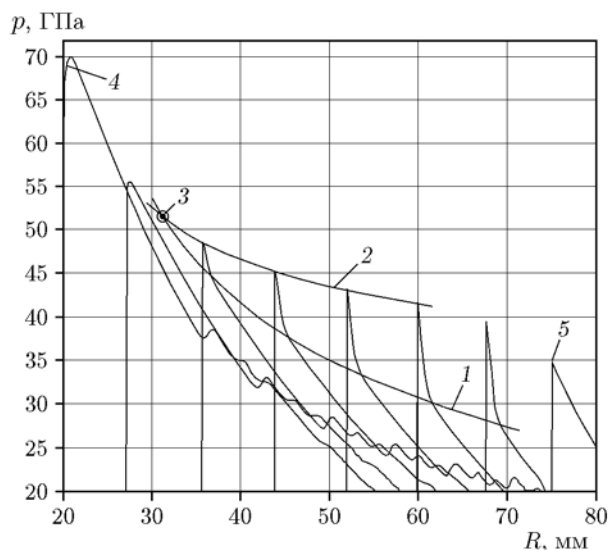


Рис. 5. Расчетные профили давления в детонационной волне в ПСТ в моменты выхода ее на разные радиусы заряда:

1 — кривая максимальных состояний ПВ за химпиком, 2 — кривая максимальных состояний в химпике, 3 — точка пересечения кривых 1 и 2, 4 — зона «перевернутого» химпика, 5 — импульс инициирования

20 мм, когда давление на фронте ниже последующего максимального давления. Максимальное давление на этом радиусе 70 ГПа. Названная точка пересечения кривых 1 и 2 реализуется на радиусе 31 мм при давлении 52 ГПа. Скорость фронта и массовая скорость ПВ в этой точке равны 8.55 и 3.18 км/с соответственно. Следует отметить, что в используемой модели детонации состояния на кривой 1 — это состояния на адиабате ПВ от точки Жуге и выше, а на кривой 2 — состояния, принадлежащие ударной адиабате «нереагирующего» ВВ.

На меньших радиусах заряда при больших давлениях скорость превращения ВВ в ПВ становится очень высокой, реакция проходит полностью на ширине детонационного фронта, химпик вырожден. Данные соображения о скорости реакции высказывались ранее в [6, 19, 20]. В зоне «переворачивания» химпика реакция, возможно, идет с образованием промежуточных продуктов при неполном энерговыделении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

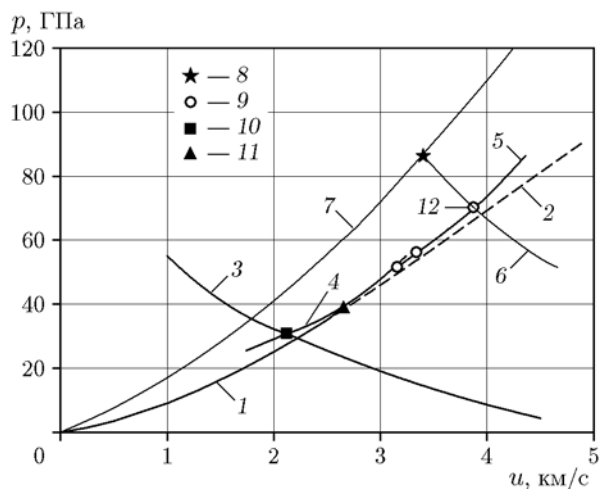
На рис. 6 приведена p, u -диаграмма состояний в исследуемом ВВ, его ПВ и на контактной границе с окном из LiF

Видно, что нахождение состояния в исследуемом ВВ по экспериментальному значению скорости $u(t)_{\text{LiFmax}}$ на контактной границе с LiF с использованием зеркально отображенной экстраполяции ударной адиабаты «нереагирующего» ПСТ из расчетов данной работы дало состояние 12 (см. рис. 6), совпадающее с пиковым состоянием расчетного профиля на радиусе 20 мм. Таким образом, экспериментально-расчетные параметры пересжатой детонации на радиусе 20 мм в максимуме профиля таковы: давление 70 ГПа, скорость фронта 9.45 км/с, массовая скорость ПВ 3.88 км/с. Пересжатие по давлению относительно точки Жуге при нормальной детонации достигало в рассматриваемом эксперименте 2.3.

Полученное попадание искомого состояния ПСТ, определяемого по экспериментальному значению скорости $u(t)_{\text{LiFmax}}$, на ударную адиабату «нереагирующего» ВВ указывает, во-первых, на хорошее соответствие расчетного описания детонации ее реализации в эксперименте. А во-вторых, можно в таком случае полученное состояние считать состоянием действительно еще не реагирующего ВВ?! Но

Пороговые параметры состояния ТАТБ и ВВ на его основе при вырождении химпика

ВВ, плотность, г/см ³	Способ пересечения	Параметры состояния ВВ			Источник данных
		u , км/с	p , ГПа	степень пересечения	
ТАТБ, 1.82	Удар пластиной из алюминия	2.92	47.7	1.76	[9]
ТАТБ/инерт	Удар пластиной из меди	2.7	40	1.3	[6]
PBX 9502, 1.89	Удар пластиной из алюминия	3.0	46	1.6	[25]
ПСТ, 1.91	Встречное повторное сжатие химпика	—	65	2.1	[24]
ПСТ, 1.91	Сферическое схождение	3.16	51.5	1.67	Данная работа

Рис. 6. p,u -Диаграмма состояний ПСТ и его ПВ внутри заряда и на контактной границе с окном из LiF:

кривые: 1 и 2 — ударная адиабата «нереагирующего» ПСТ из [4] и ее экстраполяция, 3 — кривая торможения ПСТ из [12], 4 — зеркальное отображение кривой торможения ПСТ относительно вертикали, проходящей через точку Жуге, 5 — аппроксимация расчетных точек данной работы, 6 — зеркальное отображение кривой 5, проходящее через состояние на контактной границе с LiF, 7 — ударная адиабата LiF; точки: 8 — экспериментально полученное состояние ПСТ на контактной границе с LiF $u(t)_{LiFmax}$ (данная работа), 9 — пиковые состояния в ПСТ на расчетных профилях (данная работа), 10 — точка Жуге ПСТ по [12], 11 — состояние Неймана в пластифицированном ТАТБ по [4], 12 — состояние ПСТ, получаемое по экспериментальному значению $u(t)_{LiFmax}$

твердо утверждать это нельзя, поскольку зеркальное отображение кривой торможения ПВ ПСТ (см. рис. 6), располагающееся выше адиабаты «нереагирующего» ВВ, но очень близко к ней, должно при экстраполяции вверх пересечь ее при 52 ГПа и идти далее ниже удар-

ной адиабаты тоже близко к ней. В таком случае для нахождения состояния 12 по $u(t)_{LiFmax}$ можно использовать экстраполяцию кривой 4, и это будет, наоборот, состоянием ПВ ПСТ. В связи с недостаточностью экспериментальных данных в рассматриваемой области давлений можно вслед за авторами [5, 6] говорить также не о пересечении адиабат ВВ и ПВ, а об их слиянии в рассматриваемой точке.

Как сказано выше, приведенные в таблице пороговые параметры являются параметрами в рассматриваемой точке пересечения (слияния) адиабат «нереагирующего» ВВ и его ПВ. Представленный диапазон пороговых давлений достаточно широк $40 \div 65$ ГПа. Такой разброс пороговых значений связан, во-первых, с достаточно грубым (широким) шагом варьирования условий нагружения, например скоростей пластин-ударников. Во-вторых, с различием приведенных ВВ по плотности, размеру зерна, по типу и содержанию инерта (пластификатора). В-третьих, свой вклад вносит и способ пересечения. При этом фактор времени существования максимально пересжатого состояния вблизи детонационного фронта может быть решающим. Так, максимальное значение давления 65 ГПа при встречном повторном сжатии химпика реализуется в течение предельно короткого времени, стремящегося к нулю, так как получается оно экстраполяцией информации, регистрируемой в течение $100 \div 300$ нс, к нулевому времени. Значение давления 52 ГПа при сферическом сжатии детонации реализуется на профиле с падением за фронтом регистрируемой массовой скорости, а следовательно, и давления, т. е. время существования максимальных значений невелико — около 50 нс (см. рис. 3, 4). При пересечении детонации ударом пластины состояние пересечения поддерживается постоянным более длительное время

мя — $0.5 \div 1$ мкс. При этом пороговые давления ниже.

Для детализации рассматриваемых явлений требуются дальнейшие исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном эксперименте реализован режим пересжатой детонации в полусферическом заряде пластифицированного ТАТБ. С использованием лазерно-интерферометрических методик осуществлена многоканальная регистрация временного профиля детонационной волны на контактной границе с окном из LiF на радиусе заряда 20 мм. Форма профиля треугольная — с падением массовой скорости за фронтом волны. Причина снижения скорости — разгрузка ПВ за фронтом в телесный угол 2π .

Проведенное численное моделирование эксперимента с учетом кинетики превращения ВВ—ПВ позволило, во-первых, с использованием метода p, u -диаграмм найти состояние на фронте пересжатой детонации внутри исследуемого ВВ по экспериментально полученному значению скорости $u(t)_{\text{LiFmax}}$ на контактной границе с LiF. Параметры состояния: давление 70 ГПа, скорость фронта 9.45 км/с, массовая скорость ПВ 3.88 км/с, степень пересжатия 2.3. Во-вторых, моделирование позволило увидеть эволюцию детонационного профиля при его сжатии и найти точку пересечения адиабат «нераагирующего» пластифицированного ТАТБ и его ПВ, реализующуюся на радиусе заряда 31 мм при давлении 52 ГПа.

Сопоставление полученных параметров в точке пересечения адиабат с имеющимися литературными данными для ТАТБ и составов на его основе выявило большой разброс данных. Среди приводящих к разбросу факторов важным представляется время существования состояния с максимальными параметрами вблизи детонационного фронта, определяемое способом пересжатия детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jackson R. K., Green L. G., Barlett R. et al. Initiation and transition regularities in TATB // Proc. 6th Symp. (Int.) on Detonation, Coronado, California, USA, Aug. 24–27, 1976.
2. Sheffield S. A., Bloomquist D. D., Tarver C. M. Subnanosecond measurements of detonation fronts in solid high explosives // J. Chem. Phys. — 1984. — V. 80, N 8. — P. 3831–3844. — DOI: 10.1063/1.447164.
3. Dick J. J., Forest C. A., Ramsay J. B., Seitz W. L. The Hugoniot and shock sensitivity of a plastic-bonded TATB explosive PBX 9502 // J. Appl. Phys. — 1988. — V. 63, N 10. — DOI: 10.1063/1.340428.
4. Шорохов Е. В., Литвинов Б. В. Ударная сжимаемость взрывчатых композиций на основе ТАТБ в диапазоне давлений от 0.1 до 40 ГПа // Хим. физика. — 1993. — Т. 12, № 5. — С. 722–723.
5. Lubyatinsky S. N., Loboiko B. G. Detonation reaction zones of solid explosives // Proc. 12th Symp. on Detonation, Snowmass, Colorado, USA, 1998.
6. Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
7. Федоров А. В. Параметры пика Неймана и структура фронта детонационной волны конденсированных взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 10. — С. 13–21.
8. Федоров А. В., Михайлов А. Л., Антонюк Л. Л., Назаров Д. В., Финюшин С. А. Определение параметров зоны химической реакции, состояний пика Неймана и Чепмена — Жуге в гомогенных и гетерогенных ВВ // XII междунар. конф. «Забабахинские научные чтения»: сб. тез. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2012. — С. 94.
9. Козлов Е. А., Таржанов В. И., Теличко И. В., Воробьев А. В., Левак К. В., Маткин В. А., Павленко А. В., Малюгина С. Н., Дулов А. В. Структура зоны реакции детонирующего мелкозернистого ТАТБ. Эксперимент // Ударные волны в конденсированном веществе: сб. тр. междунар. конф., Киев, Украина, 16–21 сентября, 2012 г. — Киев: Интерпресс ЛТД, 2012. — С. 58–60.
10. Аминов Ю. А., Вершинин А. В., Еськов Н. С., Костицын О. В., Рыкованов Г. Н., Сибилев В. А., Стриженок М. А. Модифицированная модель макрокинетики детонации ВВ на основе ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 1. — С. 94–97.
11. Физические модели детонации гетерогенных кристаллических взрывчатых веществ: сб. ст. / под ред. К. Ф. Гребенкина. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017.
12. Аминов Ю. А., Горшков М. М., Заикин В. Т., Коваленко Г. В., Никитенко Ю. Р., Рыкованов Г. Н. Исследование торможения продуктов детонации взрывчатого вещества на основе ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 2. — С. 121–124.
13. Айвазов В. Б., Зельдович Я. Б. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубе // ЖЭТФ. — 1947. — Т. 17, № 10. — С. 888–900.

14. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997.
15. Альтшулер Л. В., Трунин Р. Ф., Крупников К. К., Панов Н. В. Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах // Успехи физ. наук. — 1996. — Т. 166, № 5. — С. 575–581. — DOI: 10.3367/UFNr.0166.199605f.0575.
16. Альтшулер Л. В., Крупников К. К., Бражник М. И. Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот до четырех миллионов атмосфер // ЖЭТФ. — 1958. — Т. 34, вып. 4. — С. 874–885.
17. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. — М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1955.
18. Козлов Е. А., Таржанов В. И., Теличко И. В., Воробьев А. В., Левак К. В., Маткин В. А., Кучко Д. П., Ральников М. А., Боярников Д. С., Павленко А. В., Малюгина С. Н., Дулов А. В. Структура зоны реакции ТАТБ при нормальной и пересжатой детонации // XV Харитоновские тематические научные чтения: сб. докл. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 43–54.
19. Green L. G., Tarver C. M., Erskine D. J. Reaction zone structure in supracompressed detonating explosives // Proc. 9th Symp. (Int.) on Detonation, Portland, Oregon, USA, Aug. 27 — Sept. 1, 1989.
20. Tang P. K., Anderson W. W., Fritz J. E., Hixson R. S., Vorhman J. E. A study of the overdriven behaviors of PBX 9501 and PBX 9502 // Proc. 12th Symp. (Int.) on Detonation, San Diego, Aug. 11–16, 2002.
21. McMillan C. F., Goosman D. R., Parker N. L., Steinmetz L. L., Chau H. H., Huen T., Whipkey R. K., Perry S. J. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry // Rev. Sci. Instrum. — 1988. — V. 59, N 1. — DOI: 10.1063/1.1140014.
22. Strand O. T., Goosman D. R., Martinez C., Whitworth T. L., Kuhlow W. W. A novel system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // Rev. Sci. Instr. — 2006. — V. 77. — 083108.
23. Таржанов В. И. Кривая торможения химпика — новая характеристика детонирующих ВВ // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 133–134. — DOI: 10.375/FGV20200614.
24. Таржанов В. И., Воробьев А. В., Кучко Д. П., Ральников М. А., Комаров Р. В., Бондарчук Г. Г. Кривая торможения химпика детонирующего пластифицированного триа-минотринитробензола // Горение и взрыв. — 2020. — Т. 13, № 3. — С. 114–124. — DOI: 10.30826/CE20130311.
25. Vorthman J. E., Hixson R. S., Anderson W. W., Fritz J. E., Shaw M. S. Release isentropes in overdriven PBX 9502 // AIP Conf. Proc. — 2000. — V. 505, N 1. — P. 223–226. — DOI: 10.1063/1.1303461.

Поступила в редакцию 04.08.2021.

После доработки 07.02.2022.

Принята к публикации 28.02.2022.