

УДК 544.452.1

ВЗРЫВНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина, И. Ю. Лисков,
Г. М. Белокуров

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650000 Кемерово,
lesinko-iuxm@yandex.ru

Приведена модель инициирования взрывного разложения композитных материалов на основе слабопоглощающих излучение бризантных ВВ и ультрадисперсных металлических включений при воздействии импульсов лазерного излучения наносекундной длительности. Модель базируется на экспериментальных результатах, полученных при исследовании взрывного разложения тэна с включениями ультрадисперсных металлических частиц (Al, Ni, Fe). В рамках модели сформулирован научно-обоснованный алгоритм определения состава материала с минимальными порогами лазерного инициирования взрывного разложения, который позволяет заменить большую часть экспериментов теоретическими расчетами и оптико-акустическими измерениями. Алгоритм верифицирован по данным лазерного инициирования гексогена с включениями ультрадисперсных частиц железа.

Ключевые слова: лазерное инициирование, ультрадисперсные частицы, взрыв, гексоген, тэн, горячая точка, ударно-волновой механизм.

DOI 10.15372/FGV2022.9290

ВВЕДЕНИЕ

Исследование лазерного инициирования взрывчатых веществ (ВВ) началось практически сразу после создания лазеров [1, 2]. Взрывное разложение инициирующих ВВ осуществляется относительно легко [1, 3], в то время как инициирование бризантных ВВ требует значительной лазерной энергии. Такие ВВ, как тэн, гексоген и октоген, практически не поглощают энергию лазерного излучения видимого и инфракрасного диапазонов [2, 4]. Использование различного рода добавок, поглощающих или рассеивающих лазерное излучение, позволило снизить пороги критической плотности энергии или мощности лазерного излучения взрывного разложения [4–18].

На порог взрывного разложения ВВ влияют такие факторы, как концентрация поглощающих включений в образце ВВ, размер частиц включений, условия газодинамической

разгрузки образца, длина волны лазерного излучения и плотность образца. Причем все эти факторы действуют одновременно. В работах [4–18] проводились исследования влияния отдельных факторов на порог взрывного разложения композитных ВВ, предложены различные модели лазерного инициирования. Тем не менее модель, объясняющая действие всех вышеперечисленных факторов, до настоящего времени не разработана. Для создания экспериментально обоснованной модели лазерного инициирования взрывного разложения бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных металлических частиц необходимо исследовать влияние каждого из названных факторов в одинаковых условиях эксперимента.

Цель данной работы — установить общие закономерности влияния вышеперечисленных факторов на порог взрывного разложения тэна с включениями ультрадисперсных металлических частиц и на базе этих закономерностей сформулировать модель, которая позволит прогнозировать чувствительность бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных металлических частиц к лазерному воздействию.

МОДЕЛЬ

В работах [19–30] проведено исследование влияния различных факторов на взрыв-

Работа выполнена в рамках госзадания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект 121031500513-4, руководитель Адуев Б. П.) на оборудовании ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

Доложено на 10-й Международной конференции им. В. В. Воеводского «Химия и физика элементарных химических процессов», 5–9 сентября 2022 г., Новосибирск.

© Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Нелюбина Н. В., Лисков И. Ю., Белокуров Г. М., 2023.

ное разложение композитов на основе тэна с включениями наночастиц Al, Ni, Fe. Исследовалось влияние размера и массовой доли включений [19–24], влияние условий газодинамической разгрузки образцов [25, 26] и длины волны лазерного излучения [27, 28] на порог лазерного инициирования взрывного разложения ВВ. Установлена корреляция между взрывчатостями и оптико-акустическими характеристиками композитных материалов [19, 24–26].

Проведенные исследования позволили сформулировать экспериментально обоснованную модель взрывного разложения композитов на основе слабо поглощающих излучение бризантных ВВ (например, тэна, гексогена) с включениями ультрадисперсных металлических частиц при лазерном инициировании.

Модель включает в себя следующие положения:

а) поглощение лазерного излучения металлическими частицами вызывает нагрев частиц и прилегающих слоев ВВ до температуры выше температуры плавления ВВ [24, 31]. Частица и окружающее ее нагретое ВВ представляют собой горячую точку (рис. 1);

б) для каждого типа включений в образцах ВВ существуют оптимальная массовая доля $\chi_{opt} = \sum m_i / m_{ВВ}$ (где m_i , $m_{ВВ}$ — масса металлической частицы и ВВ) [19–23] и оптимальный размер d_{opt} [21, 23], при которых порог лазерного инициирования взрывного разложения (H_{cr}) минимален (рис. 2);

с) при плотности энергии выше порогового значения H_{cr} во время действия лазерного им-

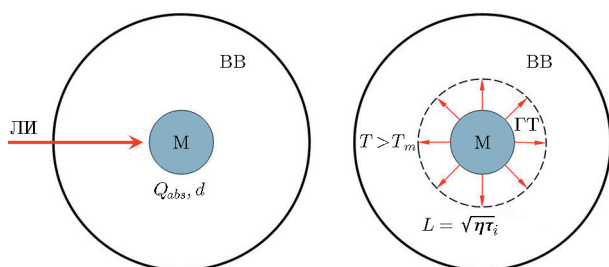


Рис. 1. Схема образования горячей точки:

ЛИ — лазерное излучение, ВВ — взрывчатое вещество, М — частица металла, ГТ — горячая точка, T_m — температура плавления, L — толщина прогреваемого слоя, η — температуропроводность, τ_i — длительность лазерного импульса, Q_{abs} — коэффициент эффективности поглощения излучения (отношение истинного сечения поглощения к геометрическому сечению частицы), определяемый из теоретических расчетов в рамках теории Ми [32, 33], d — размер частицы

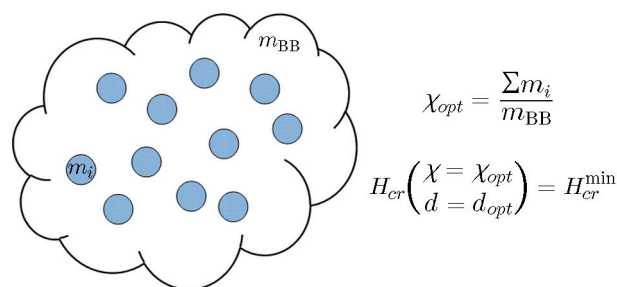
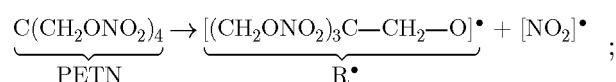


Рис. 2. Модель оптимального материала ВВ с включениями, для которого порог лазерного инициирования взрывного разложения минимален

пульса происходит диссоциация молекулы тэна на возбужденный радикал $\text{NO}_2^\bullet$ и остаточный радикал $\text{R}^\bullet$ [29]:



д) в остаточном радикале $\text{R}^\bullet$ протекают экзотермические химические реакции, приводящие к превращению его в газообразные продукты и к взрыву в микросекундном временном интервале, который сопровождается тепловым свечением [30];

е) во время действия лазерного импульса поглощение энергии излучения происходит в поверхностном слое образца. В результате развития химической реакции в горячих точках температура и давление в облученном слое повышаются, что приводит к возникновению ударной волны и ее распространению в необлученную часть образца, в которой взрывное разложение развивается по ударно-волновому механизму (рис. 3) [19, 25, 26];

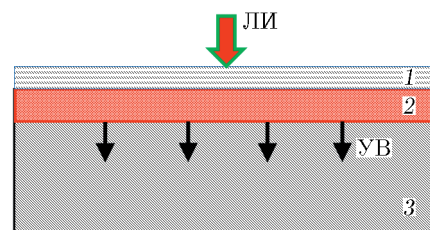


Рис. 3. Схема развития взрывного разложения ВВ с включениями по ударно-волновому механизму при лазерном инициировании:

1 — прозрачная пластина, 2 — поверхностный слой образца, 3 — образец толщиной 1 мм

f) необходимым условием взрыва является блокирование газодинамической разгрузки со свободной поверхности образца [25, 26].

Лазерное инициирование взрывного разложения тэна с включениями ультрадисперсных частиц металлов (Al, Ni, Fe) определяется одновременным действием всех этих факторов. Используя результаты, полученные в работах [19–28], можно целенаправленно влиять на действие того или иного фактора в зависимости от необходимости.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из практически важных результатов работы является экспериментальное обнаружение корреляции оптико-акустических и взрывчатых характеристик композитных материалов. Амплитуда оптико-акустических сигналов максимальна при массовых долях включений χ_{opt} . При этих же значениях χ_{opt} порог лазерного инициирования взрывного разложения H_{cr} исследованных композитов минимален. Поскольку оптико-акустические эксперименты можно проводить в дозрывном режиме, это позволяет исследовать различные композиты с целью найти материалы с минимальным порогом энергии лазерного инициирования H_{cr} , не проводя при этом взрывных испытаний, а ограничиваясь теоретическими расчетами и оптико-акустическими измерениями, что резко сокращает трудозатраты и стоимость экспериментальных работ.

Обобщение изученных факторов, влияющих на порог энергии инициирования взрывного разложения H_{cr} в рамках предложенной выше модели, позволяет сформулировать научно-обоснованный алгоритм получения материалов на основе слабо поглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных металлических частиц с минимальными плотностями энергии инициирования H_{cr} , не прибегая к взрывным экспериментам. Алгоритм состоит из следующих действий:

а) расчет коэффициента эффективности поглощения $Q_{abs}(d, \lambda)$ с длиной волны λ лазерного излучения в зависимости от размера металлической частицы d в матрице при заданной плотности образца бризантного ВВ (тэн, гексоген, октоген и т. д.). Методика расчета $Q_{abs}(d, \lambda)^*$ в рамках модифицированной тео-

рии Ми в прозрачных и рассеивающих средах предложена в работе [31];

б) определение оптимального размера частицы d_{opt} в максимуме полученной зависимости;

с) оптико-акустические измерения зависимости амплитуды акустического сигнала U от массовой доли металлических включений χ в образце с использованием частиц оптимального размера d_{opt} ;

д) определение оптимальной массовой доли включений χ_{opt} , соответствующей максимуму зависимости $U(\chi)$.

Предложенный алгоритм позволит получать образцы ВВ с включениями частиц металла оптимального размера d_{opt} с оптимальной массовой долей включений χ_{opt} , которые потребуют минимальной лазерной энергии для инициирования взрывного разложения (H_{cr}^{min}) при выбранной плотности ВВ.

Для проверки предложенной модели и алгоритма получения материалов на основе слабо поглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных металлических частиц, характеризующихся минимальными плотностями энергии инициирования, были проведены исследования лазерного инициирования гексогена с включениями металлических частиц. Гексоген, в отличие от тэна (класс нитрат спиртов), относится к классу нитрамин и так же, как и тэн, содержит нитрогруппу NO_2 , как и многие представители бризантных ВВ — тротил, октоген и т. д. Так же как и тэн, гексоген является веществом, слабо поглощающим излучение на длинах волн $\lambda = 532$ и 1064 нм.

Согласно алгоритму вначале был проведен расчет $Q_{abs}(d, \lambda)$ в зависимости от размера включений наночастиц Fe на длинах волн излучения $\lambda = 532$ и 1064 нм в матрице гексогена. Результаты представлены на рис. 4, оптимальный размер частиц равен $d_{opt} = 82$ нм на длине волны $\lambda = 532$ нм и $d_{opt} = 180$ нм в случае $\lambda = 1064$ нм. Максимум в распределении по размерам имеющихся у нас частиц железа составил 75 нм, что близко к оптимальному размеру при $\lambda = 532$ нм. В связи с тем, что при таком размере частиц значения коэффициента Q_{abs} при $\lambda = 532$ нм в три раза выше, чем в случае $\lambda = 1064$ нм, в дальнейших экспериментах использовали излучение второй гармоники (532 нм) неодимового лазера.

Для оптико-акустических измерений ис-

* $Q_{abs} = \sigma/\sigma_g$, где σ — истинное сечение поглощения излучения частицей, σ_g — геометрическое сечение [32].

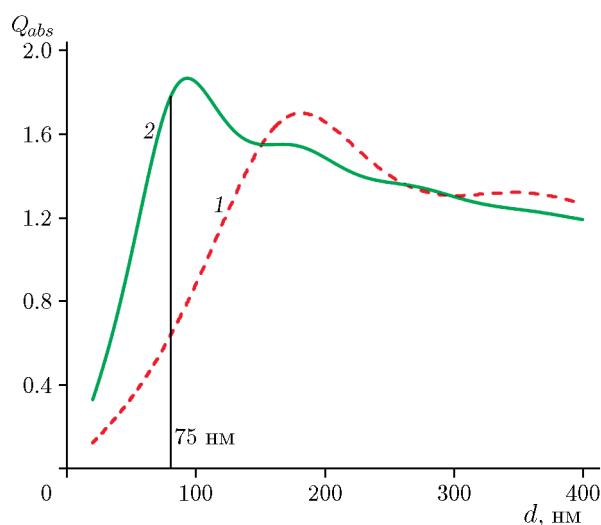


Рис. 4. Рассчитанные зависимости коэффициента эффективности поглощения наночастиц железа в матрице гексогена от диаметра при длине волны $\lambda = 1064$ (1) и 532 нм (2)

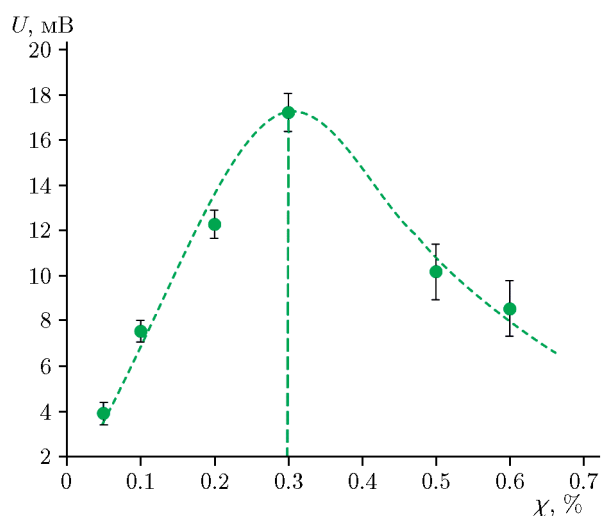


Рис. 5. Зависимость амплитуды оптико-акустического сигнала при лазерном воздействии на композит гексоген/железо от массовой доли включений железа в дозрывном режиме

пользовали наночастицы размером в максимуме распределения 75 нм. На рис. 5 представлена зависимость амплитуды U оптико-акустического сигнала от массовой доли включений χ . Из рисунка следует, что максимальная амплитуда оптико-акустического сигнала соответствует значению $\chi = 0.3$ %. Согласно приведенному выше алгоритму это значение соответствует оптимальной доле включений χ_{opt} , при которой достигается минимальный порог взрывного разложения гексогена с включениями наночастиц Fe размером $d_{opt} =$

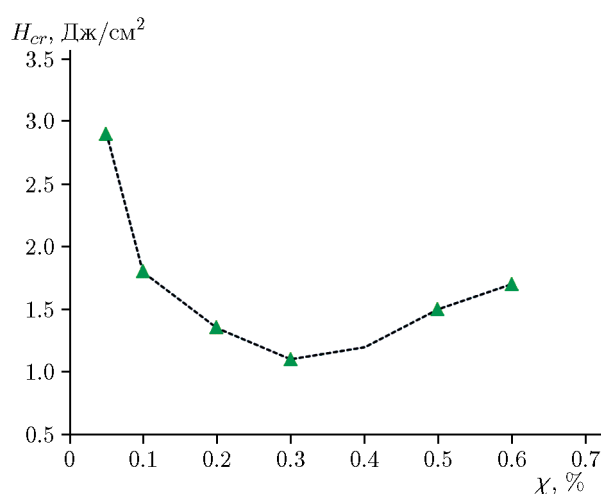


Рис. 6. Зависимость критической плотности энергии инициирования взрыва композита гексоген/железо излучением второй гармоники лазера от массовой доли включений железа

75 нм при воздействии излучения второй гармоники лазера.

На рис. 6 представлены результаты определения порога взрывного разложения композита гексоген/железо от массовой доли включений железа при воздействии второй гармоники излучения. Согласно рис. 6 порог взрывного разложения имеет минимальное значение $H_{cr} = 1.1$ Дж/см² при $\chi = \chi_{opt} = 0.3$ %, определенное с использованием критерия без проведения измерения зависимости $H(\chi)$.

Более подробно результаты исследования лазерного инициирования композитов на основе гексогена с включениями алюминия и никеля представлены в работах [33–35].

Таким образом, использование данного алгоритма позволяет исключить эксперименты по определению зависимости $H(\chi)$ и сразу использовать образцы с массовой долей χ_{opt} для определения H_{cr}^{min} .

ВЫВОДЫ

1. Сформулирована модель лазерного инициирования взрывного разложения композитов на основе слабо поглощающих излучение бризантных ВВ с включениями ультрадисперсных металлических частиц при лазерном иницировании. Модель учитывает действие различных факторов на порог взрывного разложения композитов: массовой доли и размера частиц включений, условий газодинамической разгрузки, длины волны излучения, плотности образцов.

2. В рамках модели сформулирован алгоритм получения композитного материала с минимальным порогом энергии инициирования взрывного разложения H_{cr} для образца заданной плотности на используемой длине волны лазерного излучения. Применение алгоритма снижает количество экспериментов по взрывному разложению ВВ для определения минимального порога инициирования, что важно в практических применениях.

3. Проведена экспериментальная проверка применимости предложенных модели и алгоритма на примере образцов гексогена с включениями ультрадисперсных металлических частиц, которая доказала их работоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриш А. А., Галеев И. А., Зайцев Б. Н., Сбитнев Е. А., Татаринцев Л. В. Возбуждение детонации конденсированных ВВ излучением оптического квантового генератора // Физика горения и взрыва. — 1966. — Т. 2, № 3. — С. 132–133.
2. Yang L. C., Menichelli V. J. Detonation of insensitive high explosives by a Q-switched ruby laser // Appl. Phys. Lett. — 1971. — V. 19, N 11. — P. 473–475. — DOI: 10.1063/1.1653778.
3. Александров Е. И., Вознюк А. Г. Иницирование азидов свинца лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 4. — С. 86–91.
4. Yong L. V., Nguyen T. C., Waschl J. A. Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants: A Review. — DSTO Aeronautical and Maritime Res. Lab., 1995.
5. Иоффе В. Б., Долголаптев А. В., Александров В. Е., Образцов А. П. Воспламенение алюминийсодержащих конденсированных систем лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 51–55.
6. Александров Е. И., Вознюк А. Г., Ципилев В. П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 3–9.
7. Deng H., Wang L., Tang D., Zhang Y., Zhang L. Review on the laser-induced performance of photothermal materials for ignition application // Energ. Mater. Front. — 2021. — V. 2, N 3. — P. 201–217. — DOI: 10.1016/j.enmf.2021.08.001.
8. Илюшин М. А., Целинский И. В., Угрюмов И. А. и др. Влияние добавок ультрадисперсных частиц углерода на порог лазерного инициирования полимерсодержащего светочувствительного взрывчатого состава // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 10. — С. 49–56.
9. Шейков Ю. В., Батьянов С. М., Калашникова О. Н., Луковкин О. М., Мильченко Д. В., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л. О механизме инициирования алюминизированных бризантных взрывных веществ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 5. — С. 57–64. — DOI: 10.15372/FGV20180508.
10. Yan Q.-L., Gozin M., Zhao F.-Q., Cohen A., Pang S.-P. Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials // Nanoscale. — 2016. — V. 8, N 9. — P. 4799–4851. — DOI: 10.1039/C5NR07855E.
11. Skripin A. S., Ovchinnikov V. A., Tsipilev V. P., Yakovlev A. N. Dependence of explosion initiation threshold of PETN with absorptive additives on the uniform compression pressure of the sample // Изв. вузов. Физика. — 2012. — № 11-3. — С. 217–218.
12. Comet M., Pichot V., Siegert B., Spitzer D., Moeglin J.-P., Boehrer Y. Use of nanodiamonds as a reducing agent in a chlorate-based energetic composition // Propell., Explos., Pyrotech. — 2009. — V. 34, N 2. — P. 166–173. — DOI: 10.1002/prep.200700900.
13. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation // Combust. Flame. — 2012. — V. 159, N 1. — P. 409–415. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.06.020.
14. Kononov A. N., Yudin N. V., Kolesov V. I., Ul'yanov V. A. Increasing the heating efficiency and ignition rate of certain secondary explosives with absorbing particles under continuous infrared laser radiation // Combust. Flame. — 2019. — V. 205. — P. 407–414. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.04.026.
15. Fang X., Sharma M., Stennett C., Gill P. P. Optical sensitisation of energetic crystals with gold nanoparticles for laser ignition // Combust. Flame. — 2017. — V. 183. — P. 15–21. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.05.002.
16. Таржанов В. И., Сдобнов В. И., Зинченко А. Д., Погребов А. И. Лазерное инициирование низкоплотных смесей тэна с металлическими добавками // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 118–125. — DOI: 10.15372/FGV20170214.
17. Таржанов В. И., Зинченко А. Д., Сдобнов В. И., Токарев Б. Б., Погребов А. И., Волкова А. А. Лазерное инициирование тэна // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 113–119.
18. Aluker E. D., Krechetov A. G., Mitrofanov A. Y., Nurmukhametov D. R., Kukulja M. M. Laser initiation of energetic materials: Selective photoinitiation regime in pentaerythritol tetranitrate // J. Phys. Chem. C. — 2011. — V. 115, N 14. — P. 6893–6901. — DOI: 10.1021/jp1089195.

19. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Никитин А. П., Каленский А. В. Особенности лазерного инициирования композитов на основе тэна с включениями ультрадисперсных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 104–111. — DOI: 10.15372/FGV20160611.
20. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Никитин А. П., Ковалев Р. Ю. Лазерное инициирование композитных материалов на основе тэна и наночастиц железа // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 7. — С. 38–43. — DOI: 10.7868/S0207401X16070025.
21. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Лисков И. Ю. Влияние размера включений ультрадисперсных частиц никеля на порог лазерного инициирования тэна // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 82–86. — DOI: 10.15372/FGV20150411.
22. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурега Р. И., Звеков А. А. Регулирование чувствительности пентаэритриттетранитрата к лазерному воздействию с помощью добавок наночастиц металлов никеля и алюминия // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 6. — С. 37–41. — DOI: 10.7868/S0207401X14060028.
23. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Колмыков Р. П., Никитин А. П., Ананьева М. В., Звеков А. А., Каленский А. В. Взрывчатое разложение таблеток пентаэритриттетранитрата, содержащих наночастицы никеля различного радиуса // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 8. — С. 37–43. — DOI: 10.7868/S0207401X16080021.
24. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Нелюбина Н. В., Тупицын А. В. Оптико-акустические эффекты в тетранитрате пентаэритрита с включениями ультрадисперсных частиц алюминия при импульсном лазерном воздействии // Оптика и спектроскопия. — 2018. — Т. 124, № 3. — С. 404–409. — DOI: 10.21883/OS.2018.03.45661.255-17.
25. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Лисков И. Ю., Белокуров Г. М., Нелюбина Н. В. Влияние изменения газодинамической разгрузки на лазерное инициирование композита ТЭН-алюминий // Журн. техн. физики. — 2019. — Т. 89, № 2. — С. 174–178. — DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47065.2471.
26. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Звеков А. А., Нелюбина Н. В. Лазерное инициирование тэна с включениями наночастиц алюминия при приложении статического давления // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 2. — С. 127–134. — DOI: 10.15372/FGV20190213.
27. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурега Р. И., Звеков А. А., Каленский А. В. Взрывчатое разложение ТЭНа с нанодобавками алюминия при воздействии импульсного лазерного излучения различной длины волны // Хим. физика. — 2013. — Т. 32, № 8. — С. 39–42. — DOI: 10.7868/S0207401X13080025.
28. Каленский А. В., Звеков А. А., Ананьева М. В., Зыков И. Ю., Кригер В. Г., Адуев Б. П. Влияние длины волны лазерного излучения на критическую плотность энергии инициирования энергетических материалов // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 98–104.
29. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Нелюбина Н. В., Каленский А. В., Алукер Н. Л. Спектрально-кинетические характеристики свечения начального этапа взрывного разложения композитов на основе тэна с включениями наночастиц металлов при лазерном инициировании // Хим. физика. — 2017. — Т. 36, № 6. — С. 45–51. — DOI: 10.7868/S0207401X17060024.
30. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Лисков И. Ю., Ковалев Р. Ю., Крафт Я. В. Измерение температуры продуктов взрыва тэна с включениями железа // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 3. — С. 115–118. — DOI: 10.15375/FGV20170313.
31. Кригер В. Г., Каленский А. В., Звеков А. А., Зыков И. Ю., Адуев Б. П. Влияние эффективности поглощения лазерного излучения на температуру разогрева включений в прозрачных средах // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 54–58.
32. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
33. Aduiev B. P., Nurmukhametov D. R., Liskov I. Y., Tupitsyn A. V., Belokurov G. M. Laser pulse initiation of RDX-Al and PETN-Al composites explosion // Combust. Flame. — 2020. — V. 216. — P. 468–471. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.10.037.
34. Aduiev B. P., Nurmukhametov D. R., Liskov I. Yu., Zvekov A. A. RDX-Al and PETN-Al composites' glow spectral kinetics at the explosion initiated with laser pulse // Combust. Flame. — 2021. — V. 223. — С. 376–381. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.10.016.
35. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звеков А. А., Нелюбина Н. В., Созинов С. А., Каленский А. В., Ананьева М. В., Галкина Е. В. Оптикоакустическое исследование и моделирование оптических свойств композитов циклотриметилентринитрамин-ультрадисперсные частицы никеля // Оптика и спектроскопия. — 2020. — Т. 128, № 5. — С. 659–668. — DOI: 10.21883/OS.2020.05.49327.313-19.

Поступила в редакцию 22.12.2022.
Принята к публикации 01.02.2023.