

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

В.И. Таржанов, В.И. Сдобнов, А.Д. Зинченко, А.И. Погребов

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина»,
456770 Снежинск, v.i.tarzhanov@vniitf.ru

Научное направление «Лазерное инициирование ВВ» возникло в СССР во Всесоюзном научно-исследовательском институте автоматики (ВНИИА). Первые открытые публикации сотрудников института относятся к 1966 – 1969 годам [1-4]. В них сообщалось:

– о первых экспериментах с возбуждением детонации в азиде свинца, тэне, гексогене, октогене и некоторых других ВВ лазерным импульсом длительностью 0,1 мкс [1],

– об обнаружении важных корреляционных зависимостей критической плотности лазерного излучения от диаметра инициирующего луча и давления запрессовки ВВ, времени работы навесок ВВ от плотности лазерного излучения, о реализации теплового механизма инициирования при лазерном воздействии [2-4],

– о первых измерениях отражательной способности азида свинца и тэна при действии лазерного излучения, о резком её изменении при подрывных значениях плотности излучения [3].

Во ВНИИТФ работы в области лазерного инициирования ВВ начались в 1969 году. Некоторые результаты по прямому инициированию тэна, инициированию его оптическим взрывом металлических плёнок, по оптическим характеристикам ВВ и плёнок, по математическому моделированию инициирования и его механизмам опубликованы в [5-10].

Идея введения во вторичные ВВ сильно поглощающих примесей для снижения энергии лазерного инициирования родилась в группе Б.Н.Зайцева в конце 1960х годов. Короткие упоминания об этом содержатся в [2-4], однако, дальнейших публикаций не было.

Исследования лазерного инициирования смесей тэна с поглощающими добавками проводились также в Горном институте [11, 12], в Томском политехническом университете [13], в Кемеровском университете и Институте углекислоты и химического материаловедения СО РАН [14-20], во ВНИИЭФ [22]. Краткий обзор этих работ приведён в [24].

Однако, на сегодня при обилии публикаций отсутствуют систематические данные по низкоплотным смесям тэна с алюминием для широкого диапазона дисперсности тэна. Цель данной работы – восполнить этот пробел представлением данных ВНИИТФ 1974-79 годов, ранее не публиковавшихся.

Постановка экспериментов

Экспериментальная сборка (рис.1) содержала заряд порошкообразной смеси тэна с металлической добавкой. Со стороны лазерного воздействия заряд, находящийся в цилиндрическом алюминиевом корпусе, примыкал вплотную к окну из стекла. С противоположной стороны он находился в контакте с пробкой из оргстекла.

Использовался лазер на неодимовом стекле, работающий в режиме модуляции добротности резонатора. Длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, длительность импульса на

полувысоте $\tau = 30$ или 40 нс, энергия в импульсе – до $4,5$ Дж. Вся экспериментальная установка описывалась ранее [5].

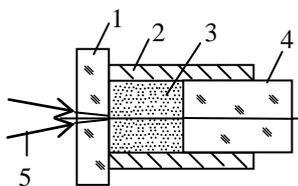


Рис 1. Схема экспериментальной сборки.

1 – стеклянное окно, 2 – корпус, 3 – смесь тэна с алюминием, 4 – пробка, 5 – лазерный пучок.

В каждом эксперименте измерялась энергия, подаваемая на заряд. Пороговая энергия инициирования $E_{0,5}$ определялась как энергия, соответствующая 50%-ой вероятности подрыва в серии из 15 – 20 опытов при варьировании энергии в импульсе. Обработка получаемых данных типа «отказ-срабатывание» проводилась по методу максимального правдоподобия с получением «кривых частоты» и, соответственно, $E_{0,5}$ [5]. Пороговая плотность энергии инициирования (интегральная за импульс) $W_{0,5}$ вычислялась по формуле

$$W_{0,5} = 4E_{0,5} / \pi d^2,$$

где d – диаметр области воздействия излучения на ВВ. Области воздействия излучения на ВВ формировались методом линзового проектирования круговых диафрагм, устанавливаемых в выровненном по интенсивности лазерном пучке, и имели резкий край.

Измерялось время работы сборки как время от момента подачи лазерного импульса до световой вспышки на контактной границе заряд – пробка. В описываемых экспериментах время работы составляло $1,2 - 1,8$ мкс в зависимости от подаваемой энергии.

В первой группе экспериментов изучались смеси тэна с крупнодисперсными порошками: олова, меди, никеля, вольфрама, алюминиевой пудры с размерами частиц $10...100$ мкм при процентном содержании их до 10%.

Во второй группе экспериментов исследовались смеси тэна с тонкодисперсным алюминием при его массовом содержании 2 – 13%. Средний размер частиц добавки составлял 1 мкм. Толщина окисной плёнки не превышала 9% радиуса частиц. Дисперсность тэна имела значения 3700, 4400, 8200 и 10200 $\text{см}^2/\text{г}$. Snаряжение сборок осуществлялось засыпкой навески смеси в корпус сборки и её последующим виброуплотнением на ручной виброустановке. В установке обеспечивалась серия необходимого числа (200...300) ударов сборки, закреплённой на столике, о стальную «наковальню». Такой технологией снаряжения достигались минимальные стабильные плотности зарядов смесей.

Исследуемые смеси готовились перемешиванием порошков тэна и металла лопаткой из медной фольги на стекле в течение 1 часа.

Экспериментальные результаты

Смеси тэна с крупнодисперсными металлами

Результаты, полученные с крупнодисперсными добавками к тэну, представлены на рис.2.

Видно, что качественно ход кривых одинаков для всех металлов. $W_{0,5}$ снижается при введении небольшого (до 1 – 3%) количества металла, затем растёт при увеличении его содержания. Все исследованные металлы дали близкие значения $W_{0,5}$ при оптимальном процентном содержании, за исключением алюминия. Больше снижение пороговой плотности энергии инициирования, полученное с ним, может быть связано с чешуйчатостью его частиц (соотношение размеров 100 мкм/10 мкм), когда его поведение

при лазерном воздействии может определяться меньшим размером. По этим результатам можно сделать заключение о несущественности влияния природы металла на $W_{0,5}$ при оптимальном содержании и близости размеров и формы частиц. Эта ситуация с независимостью $W_{0,5}$ от природы металла полностью аналогична случаю инициирования тэна лазерным взрывом тонких металлических плёнок [8].

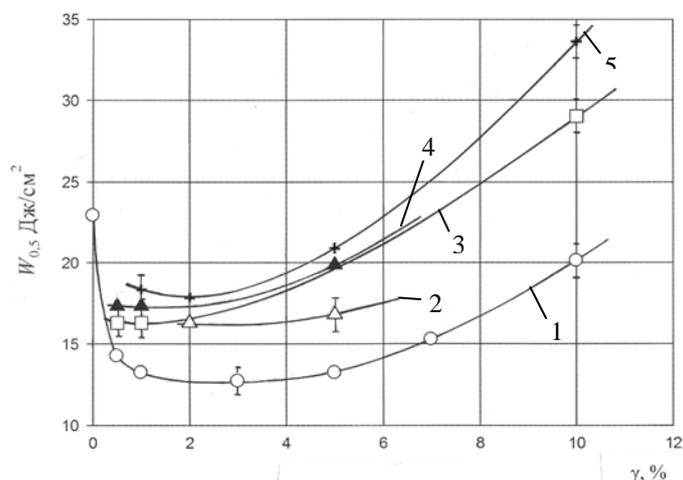


Рис. 2. Пороговая плотность энергии инициирования смесей тэна ($S = 7800 \text{ см}^2/\text{г}$, $\rho = 0,95 \text{ г}/\text{см}^3$) с крупнодисперсными добавками в зависимости от массового содержания металла.
1 – алюминий, 2 – олово, 3 – никель, 4 – вольфрам, 5 – медь.

Действие частиц алюминия ПП-1 в тэне было изучено более подробно в специальной группе экспериментов, выполненных в коротком отрезке времени с контролем энергии прямого инициирования используемого в смеси тэна. Исследовался тэн с двумя дисперсностями ($S = 5050$ и $12000 \text{ см}^2/\text{г}$) при плотности зарядов $0,9 \text{ г}/\text{см}^3$ и диаметре области воздействия излучения $d = 0,74 \text{ мм}$. Результаты показаны на рис.3. Видно, что введением в тэн одного процента (по массе) алюминиевой пудры достигается снижение $W_{0,5}$ в 2,5 раза. Кривая для тэна при дисперсности $12000 \text{ см}^2/\text{г}$ лежит выше кривой при $S = 5050 \text{ см}^2/\text{г}$, как это и должно быть при достаточно большом d [9].

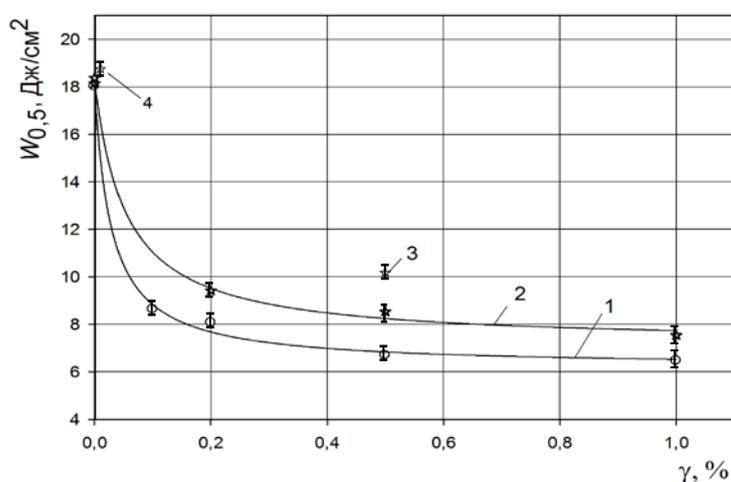


Рис. 3. Пороговая плотность энергии инициирования смесей тэна ($\rho = 0,90 \text{ г}/\text{см}^3$) с алюминием в зависимости от его массового содержания.
Дисперсность тэна: 1 – $5050 \text{ см}^2/\text{г}$, 2 – $12000 \text{ см}^2/\text{г}$. Частицы алюминия на поверхности заряда тэна: 3 – 23 частицы, 4 – одна частица.

Для тэна с $S = 12000 \text{ см}^2/\text{г}$ был проведён подсчёт частиц на поверхности в смеси с 0,5% алюминия, чтобы затем имитировать смесь размещением определённого количества частиц на поверхности заряда чистого тэна в контакте с окном. Экспериментальная точка на рис.3 для двадцати трёх частиц алюминия в области воздействия излучения свидетельствуют о том, что названная имитация смеси не возможна. $W_{0,5}$ с 23 частицами на поверхности чистого тэна, эквивалентными 0,5% – смеси, в 1,5 раза выше $W_{0,5}$ настоящей смеси с таким содержанием алюминия. Наличие же одной частицы на поверхности тэна никак не сказалось на плотности энергии его инициирования.

Смеси тэна с тонкодисперсным алюминием

Пороговые энергии инициирования смесей, полученные с диаметром области воздействия излучения d , равным 0,3 мм, приведены на рис. 4.

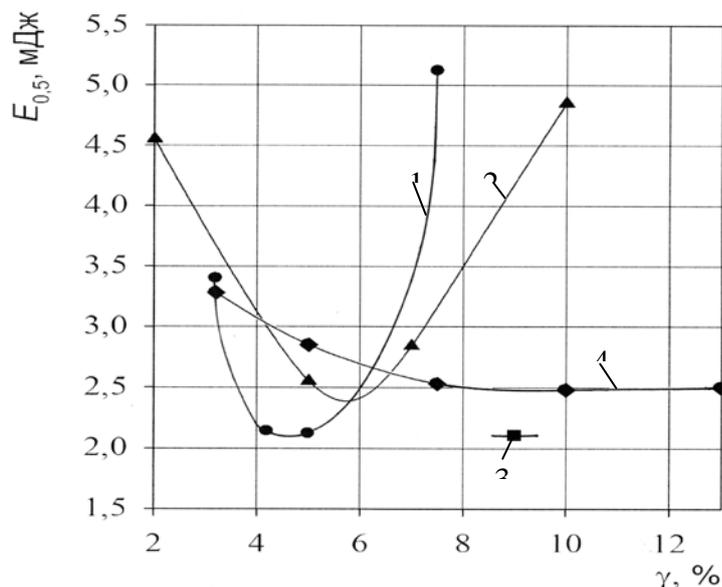


Рис. 4. Пороговая энергия инициирования смесей тэна с тонкодисперсным алюминием в зависимости от его массового содержания.

Дисперсность тэна: 1 – 3700, 2 – 4400, 3 – 8200, 4 – 10200 $\text{см}^2/\text{г}$.

Видно, что зависимости $E_{0,5}$ от содержания алюминия γ являются зависимостями с минимумами, как и в случае крупнодисперсных добавок. Наблюдается уширение этих зависимостей с увеличением дисперсности тэна. Значения энергии инициирования в минимумах близки для тэна с дисперсностями 3700 и 8200 $\text{см}^2/\text{г}$, а также – с дисперсностями 4400 и 10200 $\text{см}^2/\text{г}$. Различие (около 20%) в минимальных значениях энергии для этих двух групп смесей связано с тем, что тэн с дисперсностями 4400 и 10200 $\text{см}^2/\text{г}$, был термостабилизированным, а тэн с 3700 и 8200 $\text{см}^2/\text{г}$, – нестабилизированным. Стабилизация порошкообразных ВВ проводится для увеличения их физической стабильности за счёт снижения поверхностной дефектности кристаллов. Стабилизация сопровождается некоторым снижением чувствительности ВВ.

Снижение энергии инициирования тэна при введении в него тонкодисперсного алюминия составило в данной работе для нестабилизированного тэна с дисперсностью 8200 $\text{см}^2/\text{г}$ – 6,2 раза ($E_{0,5} = 13$ мДж при прямом инициировании).

Содержание алюминия в смесях, соответствующие минимальным значениям энергии инициирования, названы оптимальными содержаниями $\gamma_{\text{опт}}$. Выявленная зависимость $\gamma_{\text{опт}}$ от дисперсности тэна приведена на рис. 5.

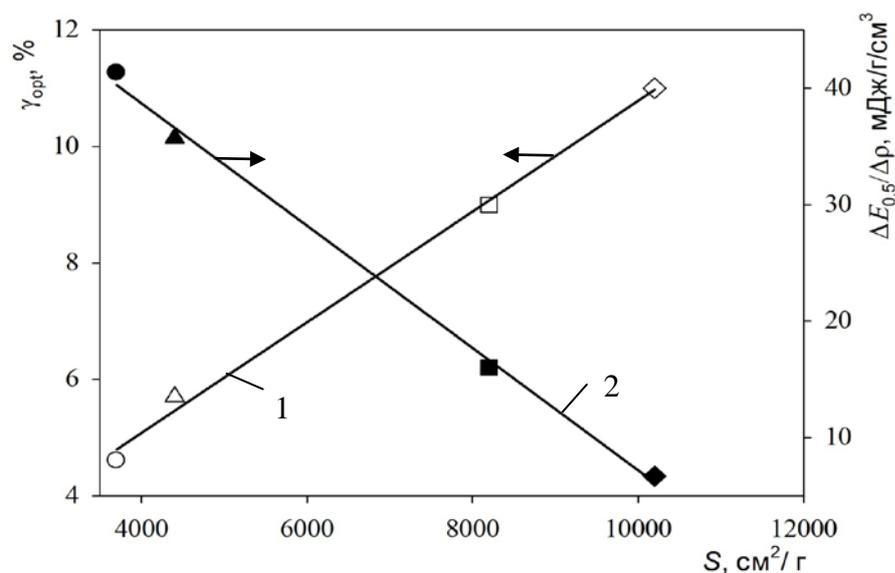


Рис. 5. Оптимальное содержание алюминия в смеси с тэном при «виброплотности» в зависимости от его дисперсности (1). Градиент энергии иницирования по плотности в зависимости от дисперсности тэна (2).

Были определены конкретные значения «виброплотности» ρ_{vibr} зарядов смесей с разным содержанием добавки для разных дисперсностей тэна (рис. 6). Видно, что с ростом γ растут плотности зарядов смесей, получаемых виброуплотнением. Таким образом, в зависимостях $E_{0,5} = f(\gamma)$ (рис. 4) присутствует, как составляющая, зависимость от плотности.

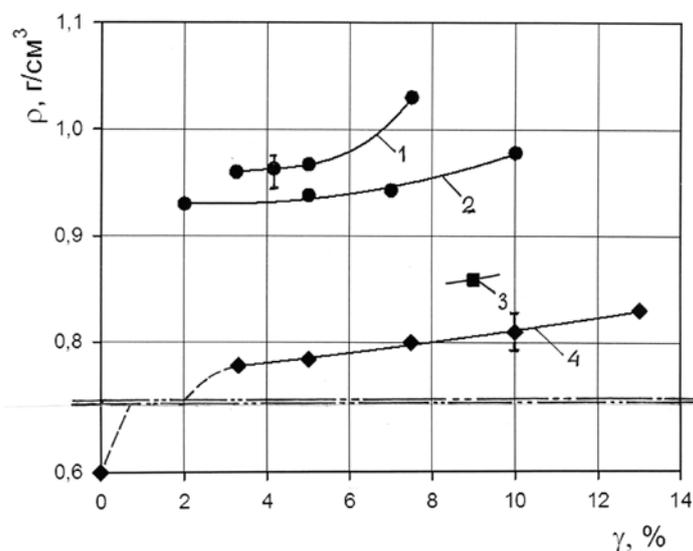


Рис. 6. Плотность зарядов смесей тэна с алюминием, реализуемая виброуплотнением, в зависимости от содержания алюминия.
Дисперсность тэна: 1 – 3700, 2 – 4400, 3 – 8200, 4 – 10200 см²/г.

Для установления в чистом виде влияния плотности на $E_{0,5}$ были проведены эксперименты с допрессованными до определённых плотностей зарядами всех смесей при оптимальных содержаниях алюминия γ_{opt} . Результаты приведены в таблице и на рис. 5. Видно, что влияние плотности весьма существенно. Градиент энергии иницирования по плотности $\Delta E_{0,5}/\Delta\rho$ растёт с уменьшением дисперсности и достигает для $S = 3700$ см²/г увеличения $E_{0,5}$ на 70% при росте ρ на 4%.

Таблица. Пороговая энергия инициирования допрессованных смесей тэна с алюминием в сравнении с энергией инициирования тех же смесей при «виброплотности».

| Состав смеси | | ρ , г/см ³ | $E_{0,5}$, мДж | ρ_{vibr} , г/см ³ | $E_{0,5 \text{ vibr}}$, мДж | $\Delta E_{0,5} / \Delta \rho$, мДж / г/см ³ |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|--|------------------------------|--|
| S , см ² /Г | γ_{opt} , % | | | | | |
| 3700 | 4,6 | 1,0 | 3,67 | 0,96 | 2,1 | 41,3 |
| 4400 | 5,7 | 0,96 | 3,32 | 0,94 | 2,5 | 35,7 |
| 8200 | 9,0 | 0,91 | 2,90 | 0,86 | 2,1 | 16 |
| 10200 | 11,0 | 0,93 | 3,30 | 0,81 | 2,5 | 6,67 |

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Механизм лазерного инициирования смесей

Существование минимумов на зависимостях $W_{0,5} = f(\gamma)$ (рис. 2, 3) и $E_{0,5} = f(\gamma)$ (рис. 4) понятно. С ростом содержания добавки возрастает передаваемая единице объёма чистого ВВ энергия вследствие того, что частицы добавки сильно снижают коэффициент отражения и глубину проникновения излучения [2, 3, 20]. С другой стороны, рост передаваемой ВВ энергии прекращается при полном перекрытии апертуры лазерного пучка частицами добавки. При дальнейшем увеличении содержания добавки возрастает её роль инертного балласта в ВВ. Понятно и смещение оптимального содержания алюминия (рис. 4) вправо при росте дисперсности тэна. При большей удельной поверхности в его объёме можно разместить больше частиц добавки.

После анализа механизма инициирования тэна оптическим взрывом плёнок [5] ясно, что каждая частица металлической примеси, находящаяся в приповерхностном слое смеси взрывается светом, и горячими продуктами взрыва, представляющими собой плазму с температурой не ниже 5000 К, возбуждает расходящуюся сферическую микроволну сжатия и химическое энерговыделение, активированное нагревом. Большое снижение пороговых параметров инициирования при использовании тонкодисперсного алюминия может быть связано с повышенной химической активностью его плазмы в очаге инициирования. При взаимодействии многих микроочагов формируется макроочаг с высокими давлением и температурой, связанными как со световым энерговодом, так и с химическим энерговыделением. Таким образом, в механизме работы смеси основную роль играет ансамбль многих частиц, заглублённых в ВВ на величину порядка размера частиц. Из общих соображений ясно, что такие частицы должны работать более эффективно, так как вся поглощаемая ими энергия излучения передаётся только ВВ, а не окну. Почти очевидное утверждение о поглощении света именно частицами примеси, а не матрицей – тэном, подтверждено экспериментально в [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленными данными ВНИИТФ 1974-79 годов демонстрируются интересные закономерности лазерного инициирования (ЛИ) одного из представителей бризантных ВВ – тэна. В области низких плотностей зарядов при варьировании дисперсности тэна количественно установлен масштаб (предсказанного в первых работах по ЛИ [1-4]) снижения пороговых параметров инициирования при введении в ВВ металлических добавок с размером частиц от 100 до 1 мкм – 2 – 6 раз. Показано существование минимумов на зависимостях пороговых параметров инициирования от содержания добавок, подтверждённое и в других работах, в том числе для более плотных зарядов. Для оптимальных содержаний крупнодисперсных добавок γ_{opt} не обнаружено значимого различия в порогах инициирования смесей от природы металла (кроме алюминия, отличавшегося резко формой частиц. Для смесей с тонкодисперсным алюминием получены существенно большее снижение $E_{0,5}$, связанное, возможно, с повышенной химической активностью его плазмы в очаге инициирования. Для этих смесей характерна

независимость порогов инициирования от дисперсности S тэна при γ_{opt} . Зависимости $E_{0,5} = f(\gamma)$ расширяются при увеличении S при одновременном смещении γ_{opt} в область больших значений (до $\gamma = 10\%$). Выявлена сильная зависимость порогов инициирования от плотности заряда смеси. Очевиден механизм лазерного инициирования смесей тэна с металлическими добавками – тепловой микроочаговый с генерацией очагов оптическим взрывом частиц добавки.

Приведённая совокупность данных представляется полезной для построения обобщённого механизма лазерного инициирования смесей тэна с сильно поглощающими добавками.

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.132–134.
2. Галеев И.А., Зайцев Б.Н. Механизм возбуждения детонации ВВ излучением оптического квантового генератора // Первый Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докладов, М., Наука, 1968, С. 146-147.
3. Галеев И.А., Зайцев Б.Н. Об отражательной способности ВВ // Физика горения и взрыва. 1969. Т.5, №3. С. 447.
4. Бриш А.А., Галеев И.А., Зайцев Б.Н., Сбитнев Е.А., Татаринцев Л.В. О механизме инициирования конденсированных ВВ излучением ОКГ // Физика горения и взрыва. 1969. Т.5, №4. С. 474–480.
5. Волкова А.А., Зинченко А.Д., Санин И.В., Таржанов В.И., Токарев Б.Б. Временные характеристики инициирования тэна лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1977. Т.13, №5. С. 760–766.
6. Зинченко А.Д., Сдобнов В.И., Таржанов В.И., Токарев Б.Б., Погребов А.И. Лазерное воздействие на пористое ВВ без его инициирования // Физика горения и взрыва. 1991. Т.27, №2. С. 97–101.
7. Зинченко А.Д., Таржанов В.И., Погребов А.И., Токарев Б.Б. Оптические характеристики некоторых порошкообразных ВВ // Физика горения и взрыва. 1992. Т.28, №5. С. 80–87.
8. Таржанов В.И., Зинченко А.Д., Смирнов Б.Н., Погребов А.И., Сдобнов В.И., Токарев Б.Б. Иницирование тэна с помощью взрывающей светом металлической пленки. // Физика горения и взрыва. 1996. Т.32, №2. С. 111–116.
9. 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.
10. Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы детонации. Сборник научных статей под ред. В.И. Таржанова. Снежинск Челябинской обл.: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998
11. Александров В.Е., Долголаптев А.В., Иоффе В.Б., Ковальчук В.М., Левин Б.В., Образцов А.П. Исследование особенностей воспламенения конденсированных сред с поглощающими добавками при концентрированном подводе лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 1983. Т.19, № 4. С.17–20 .
12. 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.
13. Александров Е.И., Вознюк А.Г. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1989. Т.25, №1. С. 3-9.
14. Захаров Ю.А., Алукер Э.Д., Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г. Предвзрывные явления в азидах тяжелых металлов. М.: ЦЭИ "Химмаш", 2002.

15. Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Лобойко Б.Г., Нурмухаметов Д.Р., Филин В.П., Казакова Е.А. Влияние температуры на лазерное инициирование тетранитрата пентаэритрита. // Химическая физика. 2008. Т.27, №5. С.53-55.
16. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Лисков И.Ю., Каленский А.В., Ананьева М.В., Звекон А.А. Закономерности инициирования взрывчатого разложения тэна импульсным излучением второй гармоники неодимового лазера. // Химическая физика. 2015. Т.34, №11. С.44-49.
17. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Пузынин А.В. Влияние добавок частиц монокарбида никеля на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному инициированию // Химическая физика. 2009. Т.28, №11. С.50-53.
18. Адуев Б.П. Влияние добавок ультрадисперсных частиц Al-Ni на чувствительность пентаэриттетранитрата к лазерному воздействию // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т.49.–, №2.– С.102–105.
19. Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р. Влияние добавок наночастиц алюминия на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному воздействию // Химическая физика. 2011. Т.30, №3. С.63-65.
20. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурег Р. И., Лисков И. Ю. Исследование поглощения света компаундами на основе тэна и наночастиц алюминия при воздействии лазерных импульсов // Химическая физика. 2014. Т. 33, № 12. С. 29-32.
21. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
22. Шейков Ю. В., Батьянов С. М., Мильченко Д. В., Власова Е. В., Вахмистров С. А., Михайлов А. Л. О механизме инициирования алюминизированных бризантных ВВ лазерным излучением // Сб. тез. докл. междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров, 2015. — С. 56–58.
23. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — Т. 1.
24. Гаржанов 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.