

УДК 662.215.1+535.21

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ НИЗКОПЛОТНЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

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

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

Представлены данные по лазерному инициированию низкоплотных смесей тэна с металлическими добавками при варьировании дисперсности тэна и размера частиц добавки. Использовался лазер с длиной волны 1.06 мкм и длительностью импульса 30 и 40 нс. Показано наличие минимумов на зависимостях пороговых параметров инициирования от содержания добавок. Для крупнодисперсных добавок не обнаружено существенной зависимости порога инициирования смесей от природы металла при оптимальном его содержании (кроме алюминия). Для смесей тэна с оптимальным количеством тонкодисперсного алюминия обнаружено существенно большее снижение пороговых параметров инициирования (6.2 раза) по сравнению с прямым инициированием тэна. Показана независимость порогов инициирования смесей от дисперсности тэна при оптимальном содержании добавки. Зарегистрировано расширение зависимостей пороговых параметров от содержания добавки с увеличением дисперсности тэна при одновременном смещении количества оптимальной добавки в область больших значений. Выявлена сильная зависимость порогов инициирования от плотности заряда смеси. Сформулированы основные положения механизма лазерного инициирования смесей тэна с добавками.

Ключевые слова: ВВ, тэн, детонация, лазерное инициирование, сильно поглощающие добавки.

DOI 10.15372/FGV20170214

ВВЕДЕНИЕ

Лазерное инициирование ВВ, как научное направление, возникло в СССР во Всесоюзном научно-исследовательском институте автоматики. Первые открытые публикации сотрудников института относятся к 1966–1969 гг. [1–4]. В них сообщалось о первых экспериментах с возбуждением детонации в азиде свинца, тэне, гексогене, октогене и некоторых других взрывчатых веществах (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 азидов свинца и тэна при действии лазерного излучения, о резком ее изменении при плотностях излучения, вызывающих взрыв [3].

Во ВНИИТФ работы в области лазерного инициирования ВВ начались в 1969 г. Неко-

торые результаты по прямому инициированию тэна, инициированию его оптическим взрывом металлических пленок, по оптическим характеристикам ВВ и пленок, по математическому моделированию инициирования и его механизмам опубликованы в [5–10].

Идея введения во вторичные ВВ сильно поглощающих примесей для снижения энергии лазерного инициирования возникла в группе Б. Н. Зайцева в конце 1960-х годов. Короткие упоминания об этом содержатся в [2–4], однако дальнейших публикаций не было. Исследование лазерного инициирования смесей тэна с поглощающими добавками проводилось также в Горном институте [11, 12]. Были проведены эксперименты с 20 различными дисперсными добавками — металлами и диэлектриками. Максимальное снижение энергии инициирования зафиксировано при использовании в качестве добавки алюминия (в 6 раз), значительно меньшее — при применении титана (2 раза) и бериллия (2.2 раза). Высказано предположение о возможной химической активности этих добавок. Для смесей тэна, гексогена, октогена, тетрила и аммиачной селитры с алюминием при размере его частиц 2.2 мкм выявлены за-

висимости плотности энергии инициирования от концентрации добавки. Ограниченная серия опытов по лазерному инициированию смесей тэна с сажей при ее содержании $0.1 \div 1$ % была проведена томскими исследователями [13]. Особенность этих опытов — поддержание давления прессования ($1.76 \cdot 10^8$ Н/м²) вплоть до лазерного воздействия. Получены весьма низкие энергии инициирования (1.3 мДж при 1 % сажи). О сильном влиянии поддерживающего давления на энергию лазерного инициирования смесей тэна с алюминием сообщалось в работе [14], выполненной во ВНИИЭФ. При давлении сжатия ВВ 0.2 ГПа энергия инициирования снижалась в 30 раз по отношению к таковой без поддерживающего давления. Сотрудники Кемеровского университета и Института углехимии и химического материаловедения СО РАН, активно изучавшие с 1990-х годов воздействие лазерного излучения на азиды тяжелых металлов [15], начали интенсивно заниматься лазерным воздействием на тэн с 2008 г. при первоначальной поддержке сотрудников ВНИИТФ [16]. К настоящему времени ими опубликовано более 20 статей (см. [17] и библиографию в ней). В работах [18–20] исследовалось лазерное инициирование смесей тэна с поглощающими добавками. В [21] оптико-акустическим методом изучалось поглощение излучения смесями тэна с наночастицами алюминия. В этих работах исследовались смеси тэна с поглощающими добавками при высокой плотности зарядов 1.73 и 1.75 г/см³. Для всех добавок получены зависимости порога инициирования от их содержания с минимумами в диапазоне содержания $0.1 \div 0.3$ % (масс.). При использовании наноразмерных частиц алюминия получена весьма низкая плотность энергии инициирования: 1.4 и 1.15 Дж/см². В [22] сообщалось об экспериментах по лазерному инициированию тэна и бензотрифуроксана в смесях с наноразмерным (50 ÷ 200 нм) алюминием, выполненных сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ. Ими также получены зависимости с минимумами порога инициирования и низкие плотности энергии инициирования ≈ 1 Дж/см². Механизм ударного испарения алюминия они считают ведущим при лазерном инициировании различных алюминизированных ВВ.

Однако на сегодняшний день, несмотря на обилие публикаций, отсутствуют систематические данные по низкоплотным смесям тэна с алюминием в широком диапазоне дисперсно-

сти тэна. Цель данной работы — восполнить этот пробел представлением данных ВНИИТФ 1974–1979 гг., ранее не публиковавшихся.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальная сборка (рис. 1) содержала заряд порошкообразной смеси тэна с металлической добавкой ($\varnothing 4 \times 4.3$ мм). Со стороны лазерного воздействия заряд, находящийся в цилиндрическом алюминиевом корпусе, примыкал вплотную к окну из стекла (ГОСТ 683-52). 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 описана в [5].

В каждом эксперименте измерялась энергия, подаваемая на заряд. Пороговая энергия инициирования $E_{0.5}$ определялась как энергия, соответствующая 50%-й вероятности подрыва в серии из 15 ÷ 20 опытов при варьировании энергии в импульсе. Обработка получаемых данных по принципу отказ — срабатывание проводилась методом максимального правдоподобия с получением «кривых частоты» и, соответственно, энергии $E_{0.5}$ [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. Размер области воздействия варьировался путем изменения фокусного расстоя-

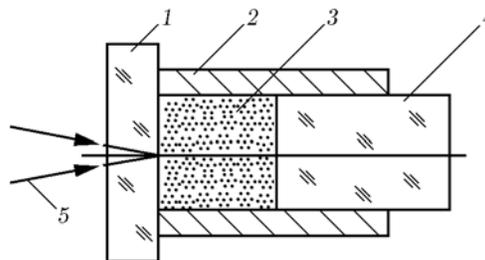


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

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

ния фокусирующей линзы и расстояния между ней и сборкой.

В первой группе экспериментов, описываемых ниже, квазигансово распределение плотности энергии излучения характеризовалось (как в [5]) эффективным диаметром области воздействия, который был равен 0.5 мм. Во второй и третьей группах экспериментов области воздействия излучения на ВВ формировались методом линзового проектирования круговых диафрагм, устанавливаемых в выровненном по интенсивности лазерном пучке, и имели резкий край.

Погрешности нахождения $E_{0.5}$ и $W_{0.5}$ составляли 5 ÷ 10 % для уровня достоверности 0.95 и показаны на рисунках для отдельных точек. Такому же уровню достоверности соответствуют погрешности других величин на рисунках.

Время работы сборок определялось как время от момента подачи лазерного импульса до фиксируемой фотоэлементом световой вспышки, возникающей на контактной границе заряд — пробка при выходе на нее детонационного фронта. В описываемых экспериментах время работы составляло 1.6 ÷ 2 мкс в зависимости от подаваемой энергии. Такие значения времени работы в сочетании с наблюдаемым бризантным разрушением корпуса сборки свидетельствуют о детонации заряда смеси.

В первой и второй группах экспериментов, различавшихся диаметром области воздействия излучения, изучались смеси тэна с крупнодисперсными порошками олова (ГОСТ 9723-61, средний размер частиц $\delta = 45$ мкм), меди ПМА (ГОСТ 4960-68, $\delta = 45$ мкм), никеля ПНК-1 ($\delta = 20$ мкм), вольфрама ВТУ 024-65 ($\delta = 40 \div 60$ мкм) и алюминиевой пудры ПП-1 ($\delta = 45 \div 100$ мкм) при содержании их до 10 %. Длительность лазерного импульса $\tau = 30$ нс.

В третьей группе экспериментов исследовались смеси тэна с тонкодисперсным алюминием при его массовом содержании 2 ÷ 13 %. Средний размер частиц добавки составлял 1 мкм. Объем оксидной пленки, оцененный по электронно-микроскопическим снимкам, не превышал 9 %. Дисперсность тэна 3 700, 4 400, 8 200 и 10 200 см²/г. Длительность импульса $\tau = 40$ нс. Снаряжение сборок осуществлялось засыпкой навески смеси в корпус сборки и ее последующим виброуплотнением на ручной виброустановке. Для уплотнения смеси прово-

дилось 200 ÷ 300 ударов сборкой, закрепленной на столике, по стальной «наковальне». Такой технологией снаряжения достигались минимальные стабильные плотности зарядов смесей. Стабильность контролировалась измерениями плотности зарядов по их массе и размерам при отработке технологии.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Смеси тэна с крупнодисперсными металлами

Результаты, полученные в случае крупнодисперсных добавок к тэну, представлены на рис. 2. Видно, что качественно ход кривых одинаков для всех металлов. Пороговая плотность энергии инициирования $W_{0.5}$ снижается при введении небольшого количества металла ($\gamma \leq 1 \div 3$ %), затем растет при его увеличении. Все исследованные металлы дали близкие значения $W_{0.5}$ при оптимальном их содержании, за исключением алюминия. В этом случае большее снижение $W_{0.5}$ может быть связано с чешуйчатостью частиц алюминия (соотношение размеров 10 : 1), когда его поведение при лазерном воздействии может определяться меньшим

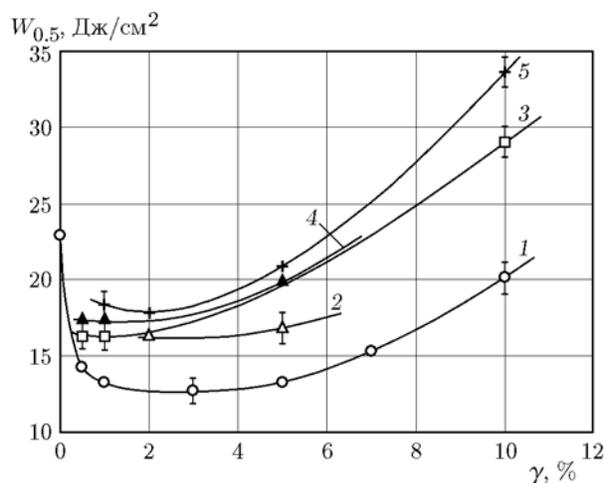


Рис. 2. Пороговая плотность энергии инициирования смесей тэна ($S = 7800$ см²/г, $\rho = 0.95$ г/см³) с крупнодисперсными добавками в зависимости от массового содержания металла:

1 — алюминий, 2 — олово, 3 — никель, 4 — вольфрам, 5 — медь

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. Заметим, что независимость $W_{0.5}$ от природы металла фиксировалась ранее при иницировании тэна лазерным взрывом металлических пленок оптимальной толщины [8].

Действие частиц алюминия ПП-1 в тэне было изучено более подробно в специальной группе экспериментов, выполненных с контролем энергии прямого иницирования используемого в смеси тэна (при $\gamma = 0$). Исследовался тэн с дисперсностью $S = 5050$ и 12000 см²/г при плотности зарядов 0.9 г/см³ и диаметре области воздействия излучения $d = 0.74$ мм. Результаты показаны на рис. 3. Видно, что введением в тэн 1 % (по массе) алюминиевой пудры достигается снижение $W_{0.5}$ в 2.5 раза. Кривая для тэна при $S = 12000$ см²/г лежит выше кривой при $S = 5050$ см²/г.

Для тэна дисперсностью 12000 см²/г под микроскопом был проведен подсчет частиц, видимых в поверхностном слое смеси с 0.5 % алюминия, чтобы затем имитировать смесь размещением определенного количества частиц на поверхности заряда чистого тэна в контакте с окном. Экспериментальная точка на рис. 3 для 23 частиц алюминия в области воздействия излучения свидетельствует о том, что названная имитация смеси невозможна. Значения $W_{0.5}$ в

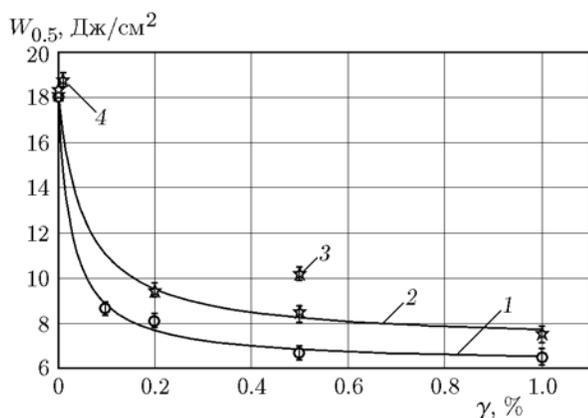


Рис. 3. Пороговая плотность энергии иницирования смесей тэна ($\rho = 0.90$ г/см³) с алюминием в зависимости от его массового содержания:

дисперсность тэна: 1 — 5050, 2 — 12000 см²/г; количество частиц алюминия на поверхности заряда тэна: 3 — 23 частицы, 4 — одна частица

области с 23 частицами на поверхности чистого тэна, что эквивалентно 0.5%-му содержанию алюминия в смеси, в 1.5 раза выше значения $W_{0.5}$ настоящей смеси с таким содержанием алюминия. Наличие же одной частицы на поверхности тэна никак не сказалось на плотности энергии его иницирования.

Смеси тэна с тонкодисперсным алюминием

Пороговые энергии иницирования смесей, полученные при диаметре области воздействия излучения $d = 0.3$ мм, приведены на рис. 4. Видно, что на зависимостях $E_{0.5}(\gamma)$ имеются минимумы, как и в случае крупнодисперсных добавок. Значения энергии иницирования в минимуме близки для тэна дисперсностью 3700 и 8200 см²/г, а также 4400 и 10200 см²/г. Различие ($\approx 20\%$) минимальных значений энергии для двух этих групп смесей связано с тем, что тэн дисперсностью 4400 и 10200 см²/г был термостабилизированным, а тэн с 3700 и 8200 см²/г — нестабилизированным. Стабилизация порошкообразных ВВ проводится для увеличения их физической стабильности за счет снижения поверхностной дефектности кристаллов. Стабилизация сопро-

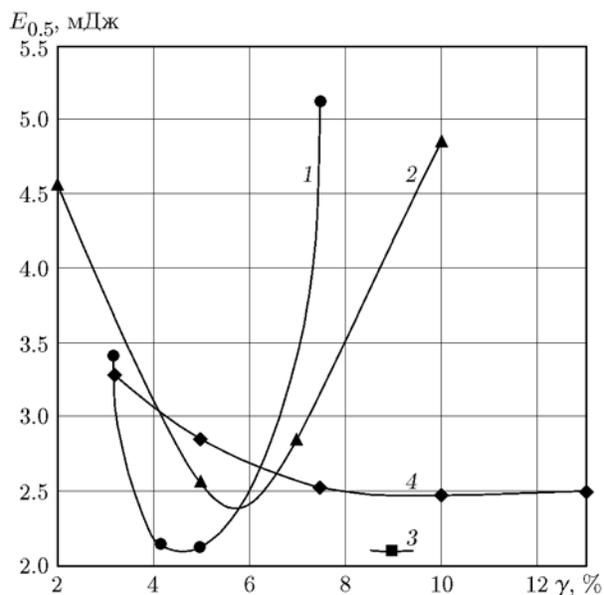


Рис. 4. Пороговая энергия иницирования смесей тэна с тонкодисперсным алюминием в зависимости от его массового содержания:

дисперсность тэна: 1 — 3700, 2 — 4400, 3 — 8200, 4 — 10200 см²/г

Пороговая энергия иницирования допрессованных смесей тэна с алюминием в сравнении с энергией иницирования тех же, но виброуплотненных смесей

Состав смеси		ρ , г/см ³	$E_{0.5}$, мДж	ρ_{vibr} , г/см ³	$E_{0.5vibr}$, 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

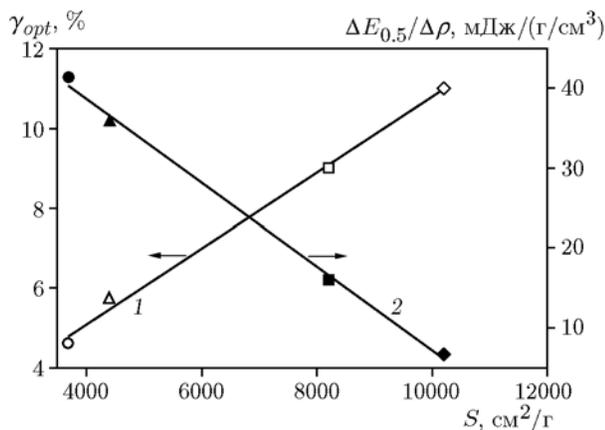


Рис. 5. Оптимальное содержание алюминия в смеси с виброуплотненным тэном (1) и градиент энергии иницирования по плотности (2) в зависимости от дисперсности тэна

вождается некоторым снижением чувствительности ВВ.

Снижение энергии иницирования нестабилизированного тэна дисперсностью 8200 см²/г при введении в него тонкодисперсного алюминия составило в данной работе 6.2 раза ($E_{0.5} = 13$ мДж при прямом иницировании).

Содержание тонкодисперсного алюминия в смесях, соответствующее минимальному значению энергии иницирования, названо оптимальным (γ_{opt}). Выявленная зависимость γ_{opt} от дисперсности тэна (как для стабилизированного, так и для нестабилизированного) приведена на рис. 5.

Были определены значения плотности виброуплотненных образцов с разным содержанием добавки при разных дисперсностях тэна (рис. 6). Видно, что с ростом γ растет плотность зарядов смесей, получаемых виброуплотнением. Таким образом, в зависимости $E_{0.5}(\gamma)$ (см. рис. 4) в качестве составляющей присут-

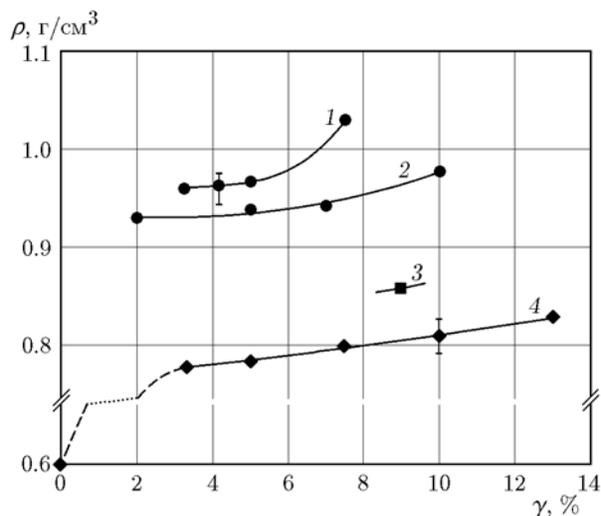


Рис. 6. Плотность зарядов смесей тэна с алюминием, реализуемая виброуплотнением, в зависимости от содержания алюминия:

дисперсность тэна: 1 — 3700, 2 — 4400, 3 — 8200, 4 — 10200 см²/г

ствует зависимость от плотности.

Для установления в чистом виде влияния плотности на энергию $E_{0.5}$ были проведены эксперименты с допрессованными до определенной плотности зарядами всех смесей при оптимальном содержании алюминия. Результаты приведены в таблице и на рис. 5. Видно, что влияние плотности весьма существенно. Градиент энергии иницирования по плотности $\Delta E_{0.5}/\Delta\rho$ растет с уменьшением дисперсности и при $S = 3700$ см²/г достигает увеличения $E_{0.5}$ на 70 % при росте плотности на 4 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существование минимумов на зависимостях $W_{0.5}(\gamma)$ (см. рис. 2, 3) и $E_{0.5}(\gamma)$ (см. рис. 4) можно объяснить следующим образом.

С ростом содержания добавки в диапазоне $\gamma = 0 \div \gamma_{opt}$ возрастает энергия, передаваемая единице объема чистого ВВ, вследствие снижения коэффициента отражения смеси и глубины проникновения излучения [2, 3, 21]. При дальнейшем увеличении добавки возрастает ее роль инертного балласта в ВВ. Понятно и смещение оптимального содержания алюминия (см. рис. 4) вправо при росте дисперсности тэна. При большей удельной поверхности глубина проникновения излучения в чистом тэне меньше [7], поэтому необходимое число частиц алюминия должно быть размещено именно на этой глубине, чтобы не допустить экранирования части из них рассеивающими излучение частицами тэна.

Из анализа механизма инициирования тэна оптическим взрывом пленок [5] стало ясно, что частицы металлической примеси, находящиеся в приповерхностном слое смеси глубиной примерно в одну оптическую толщину смеси, взрываются под действием излучения и представляют собой плазму с температурой не ниже 5 000 К, которая возбуждает расходящиеся сферические микроволны сжатия и химическое энерговыделение в тэне. Оптическая толщина смеси тэна с наноалюминием ($\delta \approx 0.1$ мкм) при плотности 1.73 г/см³ определена в [21] и равна 50 мкм при $\gamma = 0.1$ %. Эффективная зона поглощения, равная 50 мкм, установлена в [6] для чистого низкоплотного тэна. При взаимодействии многих микроочагов формируется макроочаг с высокими давлением и температурой, связанными как со световым энерговводом, так и с химическим энерговыделением. Таким образом, в механизме работы смеси основную роль играет ансамбль многих частиц, заглубленных в ВВ на величину порядка размера его частиц. Из общих соображений ясно, что такие частицы должны работать более эффективно, так как вся поглощаемая ими энергия излучения передается только ВВ, а не окну. Почти очевидное утверждение о поглощении излучения лазера именно частицами примеси, а не матрицей — тэном подтверждено экспериментально в [21]. Таким образом, механизм лазерного инициирования смесей тэна с металлическими добавками может быть определен как тепловой микроочаговый с генерацией очагов оптическим взрывом частиц добавки.

Большое снижение пороговых параметров инициирования при использовании тонкодисперсного алюминия может быть связано с вы-

сокой химической активностью его плазмы по отношению к тэну в очаге инициирования.

Сравнение представленных результатов с литературными данными, как ни странно, не всегда возможно. Так, в [11, 12] авторы приводят обобщения данных, а первичных экспериментальных результатов не приводят. В [11] для 20 исследованных добавок не указаны ни плотности зарядов, ни размер частиц добавок, а плотности мощности инициирования аномально высоки. С другой стороны, имеется и ряд совпадений с [11, 12]. Во-первых, как и в [12], наблюдается затянутое до $\gamma = 15$ % плато оптимального содержания алюминия (частицы 2.2 мкм) в смеси с тэном (частицы тоже 2.2 мкм), характерное для высокодисперсного тэна. По нашей оценке дисперсность тэна в [12] высокая ($\geq 40\,000$ см²/г) при плотности 0.77 г/см³. Во-вторых, это повышенное снижение энергии инициирования при введении в тэн алюминия (в 6 раз), по сравнению с другими металлами (для Be, Zn, Ti снижение в $2 \div 2.15$ раза). В нашей работе снижение составило 2.5 раза для пудры ПП-1 и 6.2 раза для тонкодисперсного алюминия. Последняя цифра близка к снижению в 6 раз из работы [11], но при отсутствии информации о размерах частиц добавки это мало о чем говорит. Для крупнодисперсных добавок Sn, Ni, W, Cu нами установлены снижения в $1.9 \div 2.6$ раза, похожие на приведенные выше для Be, Zn, Ti.

Полученная в [20] зависимость пороговой плотности энергии инициирования тэна (частицы размером 1.5 мкм) в смеси с наночастицами алюминия (100 \div 120 нм) от его содержания при высокой плотности заряда 1.75 г/см³ является, как и в данной работе, зависимостью с минимумом. Минимальное значение $W_{0.5}$ оказалось равным 1.4 Дж/см². Эта зависимость расположена в узком диапазоне $\gamma = 0.025 \div 1$ % с $\gamma_{opt} = 0.1$ %. Отсутствует наблюдаемое у нас уширение зависимостей $W_{0.5}(\gamma)$ при увеличении дисперсности тэна (см. рис. 4). Может быть, это характерно для высоких плотностей заряда. Значение $W_{0.5}$ для той же смеси тэна с наноалюминием при плотности заряда $\rho = 1.1$ г/см³ в [20] составило 6.5 Дж/см², в то время как при прямом инициировании чистого тэна $W_{0.5} = 23.5$ Дж/см². Выигрыш от введения алюминия — 3.6 раза. Значение 23.5 Дж/см² для прямого инициирования тэна соответствует нашим данным [9] при $\rho = 1.1$ г/см³ и $S = 10\,200$ см²/г. Какова дисперс-

ность тэна в [20] — не известно. Если принять это значение дисперсности за истину, то пересчет для него наших данных из таблицы к плотности 1.1 г/см^3 по $\Delta E_{0.5}/\Delta\rho$ дает значение $W_{0.5} = 7 \text{ Дж/см}^2$. Следовательно, значение из [20] $W_{0.5} = 6.5 \text{ Дж/см}^2$ для смеси можно считать грубо соответствующим нашим данным с учетом того, что γ_{opt} для рассматриваемой плотности не приведено. Полученная же в [20] величина $W_{0.5} = 1.4 \text{ Дж/см}^2$ для оптимальной смеси высокой плотности представляется аномально низкой, противоречащей имеющимся представлениям о росте $W_{0.5}$ с увеличением плотности заряда при любом виде инициирования [23]. Кроме того, здесь следует отметить, что обсуждаемые эксперименты [17–21] нельзя считать экспериментами по инициированию детонации в высокоплотных зарядах в связи с достаточно малыми их размерами ($\varnothing 3 \times 1 \text{ мм}$). Чтобы говорить об инициировании именно детонации, ее надо регистрировать в экспериментах. Известно, что детонация не распространяется в зарядах диаметром меньше критического диаметра детонации. Критический диаметр детонации монокристаллического тэна с плотностью заряда 1.78 г/см^3 равен $d_{cr} = 5 \text{ мм}$ [23]. При используемых в [17–21] плотностях $1.73 \div 1.75 \text{ г/см}^3$ значение d_{cr} может быть больше 3 мм (на восходящей ветви зависимости $d_{cr}(\rho)$), а применяемая длина заряда может быть меньше «глубины возникновения детонации», да и металлическая подложка может оказывать поддерживающее влияние на очаг энерговода. То есть наблюдаемые пороги вспышки энерговыделения могут быть значимо ниже порогов инициирования детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные исследований 1974–1979 гг. демонстрируют интересные закономерности лазерного инициирования одного из бризантных ВВ — тэна. В области низких плотностей зарядов при варьировании дисперсности тэна количественно установлен масштаб (предсказанного в первых работах по лазерному излучению [1–4]) снижения пороговых параметров инициирования при введении в ВВ металлических добавок с размером частиц от 100 до 1 мкм — $2 \div 6$ раз. Показано существование минимумов на зависимостях пороговых параметров инициирования от

содержания добавок, подтвержденное и в других работах, в том числе для более плотных зарядов. При оптимальном содержании крупнодисперсных добавок не обнаружено значимого различия в порогах инициирования смесей в зависимости от природы металла (кроме алюминия, резко отличавшегося формой частиц). Для смесей с тонкодисперсным алюминием существенно большее снижение $E_{0.5}$ связано, возможно, с повышенной химической активностью его плазмы по отношению к тэну в очаге инициирования. Для этих смесей характерна независимость порогов инициирования от дисперсности тэна при оптимальном содержании добавки. Зависимости $E_{0.5}(\gamma)$ расширяются при увеличении дисперсности тэна и одновременном смещении оптимального содержания добавки в область больших значений (до $\gamma = 10 \%$). Выявлена сильная зависимость порогов инициирования от плотности заряда смеси. Утверждается, что механизм лазерного инициирования смесей тэна с металлическими добавками — тепловой микроочаговый с генерацией очагов оптическим взрывом частиц добавки.

Приведенная совокупность данных представляется полезной для построения обобщенного 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. 132–133.
2. Галеев И. А., Зайцев Б. Н. Механизм возбуждения детонации ВВ излучением оптического квантового генератора // Первый Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву: тез. докл. — 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. 475–480.
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., Погребов А. И., Таржанов В. 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. Инициирование 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: сб. науч. ст. / под ред. В. И. Таржанова. — Снежинск: 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., Ципилев В. П. Влияние поглощающих примесей на зажигание ВВ лазерным излучением // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 3–9.
14. Лобанов В. Н., Ленский Р. Г., Плотников Ю. И., Рудько М. Л., Селезнев А. А., Шкаровский Ю. Н. Критические условия инициирования вторичных ВВ при импульсных тепловых воздействиях // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. — Черноголовка, 1989. — С. 25–27.
15. 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.
16. 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 // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 5. — С. 53–55.
17. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Лисков И. Ю., Каленский А. В., Ананьева М. В., Звеков А. А. Закономерности инициирования взрывчатого разложения тэна импульсным излучением второй гармоники неодимового лазера // Хим. физика. — 2015. — Т. 34, № 11. — С. 44–49.
18. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Пузынин А. В. Влияние добавок частиц монокарбида никеля на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному инициированию // Хим. физика. — 2009. — Т. 28, № 11. — С. 50–53.
19. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Ципилев В. П., Фурга Р. И. Влияние добавок ультрадисперсных частиц Al—C на чувствительность тэна к лазерному воздействию // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 102–105.
20. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р. Влияние добавок наночастиц алюминия на чувствительность тетранитропентаэритрита к лазерному воздействию // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 3. — С. 63–65.
21. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Фурга Р. И., Лисков И. Ю. Исследование поглощения света компаундами на основе тэна и наночастиц алюминия при воздействии лазерных импульсов // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 12. — С. 29–32.
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.

Поступила в редакцию 5/IV 2016 г.,
в окончательном варианте — 7/XI 2016 г.