

На правах рукописи



Алексей Валериевич Разин

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
АЗИДОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИМПУЛЬСНОМ
ИНИЦИИРОВАНИИ**

01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель: Алексей Николаевич Яковлев, кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: Федор Иванович Иванов, доктор химических наук, Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, Кафедра экологии и техносферной безопасности, профессор

Олег Валентинович Лапшин, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Отдел структурной макрокинетики, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН), г. Новосибирск

Защита состоится 21 декабря 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.269.13 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ в аудитории 217 учебного корпуса ТПУ № 8 по адресу:
ул. Усова, 7, г. Томск, 634050, Россия.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте:
<http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>

Автореферат разослан 23 октября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д.212.269.13
кандидат технических наук



А.С. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Азиды серебра и свинца относятся к азидам тяжелых металлов (АТМ) и являются инициирующими взрывчатыми веществами (ВВ). АТМ высокочувствительны к лазерному излучению (ЛИ) в спектральной области собственной прозрачности, в частности на длине волны излучения Nd:YAG-лазера 1064 нм. Несмотря на огромное количество публикаций по тематике лазерного инициирования АТМ, в том числе появившихся за последние 10 лет [3,4,5], информация остается разрозненной. А объяснение низких порогов к ЛИ трактуется с позиций разных модельных представлений: тепловой микроочаговой и цепной, базовые положения которых противоречат друг другу.

Для проверки моделей, важно проведение экспериментов по определению энергетических порогов инициирования (ЭПИ), индукционных периодов, а также скоростей развития реакции взрывного разложения при воздействии в различных спектральных диапазонах: УФ и среднем ИК. Экспериментальные данные могут уточнить представления о механизме лазерного инициирования АТМ.

Цель работы исследование кинетических характеристик взрывного разложения азидов серебра и свинца при лазерном импульсном инициировании.

Для достижения цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Определение влияния длины волны лазерного излучения на пороги и индукционные задержки;
2. Определения влияния длины волны лазерного излучения на скорость реакции разложения;
3. Определение скорости разлета продуктов в вакууме и на воздухе.

Научная новизна заключается в том, что впервые показано, что энергетический порог инициирования азидов тяжелых металлов лазерным излучением с низкой энергией фотонов (до 0,1 эВ), а также высокой энергией (до 5 эВ) близки к порогам инициирования при воздействии неодимовым лазером (Nd:YAG) и составляют соответственно 30, 20 и 10 мДж/см². При этом как пороги, так и индукционные периоды хорошо описываются в рамках тепловой модели. Показано, что процессы распространения взрывной волны как в нитевидных кристаллах (НК), так и в прессованных порошках (ПП) азидов тяжелых металлов (АТМ) не зависят от методов инициирования.

Методы исследования.

При выполнении работы использовались экспериментальные методы исследования на установке по изучению кинетических параметров взрывного разложения ВВ. Проводилось сравнение экспериментальных и теоретических данных.

По результатам работы сформулированы **защищаемые положения**:

1. Зависимость индукционного периода от способа возбуждения взрывного разложения и интенсивности воздействия описывается с позиций тепловой очаговой теории зажигания.

2. Свечение, возникающее по окончании индукционного периода, соответствует моменту разрушения и разлета вещества и является свечением продуктов разложения.

3. Развитие и распространение детонационной волны в кристаллах и порошках АТМ описывается тепловой теорией.

4. Инициирование АТМ при облучении в области собственного поглощения и области прозрачности матрицы происходит в результате локализации энергии лазерного импульса с образованием высокотемпературных тепловых микроочагов. При этом очаги образуются:

- в приповерхностном слое ВВ при воздействии в УФ-области спектра (266 нм);
- в окрестности поглощающих частиц с характерным размером $\sim 10^{-5}$ см (область прозрачности; 1,64 мкм);
- в окрестности поглощающих частиц с характерным размером 10^{-4} см (область прозрачности; 10,6 мкм).

Достоверность полученных результатов следует из корректности ставившихся задач, использования апробированных методик проведения экспериментов по лазерному инициированию и приготовлению образцов [7], анализа экспериментальных данных в рамках классических представлений о тепловом взрыве, сопоставления с результатами работ, полученных в рамках альтернативных представлений об исследуемых процессах.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что экспериментально установлены новые пределы применимости тепловой микроочаговой модели. Результаты работы позволяют прогнозировать поведение АТМ при инициировании лазерным излучением в ИК и УФ области спектров, что возможно при проектировании лазерных взрывных устройств.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты работы, выполненные лично автором, а также совместно с сотрудниками лаборатории Лазерной техники и лазерных технологий, кафедры ЛИСТ ТПУ.

Материалы диссертации вошли в отчеты по грантам: 14.В37.21.0273 «катастрофические эффекты», П517 – ЛОСИ, 10003Т/DIR – КАЭ.

Апробация работы. Результаты исследований, обобщенных в настоящей работе, докладывались на трех конференциях:

- 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, г.Томск, Россия, 17 – 21 сентября 2012 г.;

- Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, Челябинская область, Россия, 02 – 06 июня 2014 г.;
- International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, г. Томск, Россия, 21 – 26 сентября 2014г.

Публикации по теме работы. Всего результаты исследований изложены в 11 публикациях, из них 8 – журналы из списка ВАК («Физика горения и взрыва», «Известия вузов», Journal of Physics и др.)

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка цитируемой литературы из 110 наименований. Работа изложена на 117 страницах, содержит 2 таблицы, 47 рисунков и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и задачи работы, описана научная новизна, сформулированы защищаемые положения, описан личный вклад автора.

В первой главе проведен литературный обзор экспериментальных, а также теоретических работ, рассматривающих лазерное инициирование взрывчатых веществ. Рассмотрены три основные модели лазерного инициирования: микроочаговая, цепная и деформационная [1,2,8]. Большое внимание уделяется оценкам с позиций микроочаговой модели.

В рамках микроочаговой модели полагается, что несмотря на то, что ВВ прозрачно для лазерного излучения, в его объеме содержатся поглощающие неоднородности (ПН). Характерный размер таких неоднородностей $\leq 10^{-5}$ см. При этом они имеют высокий показатель поглощения μ по сравнению с показателем поглощения матрицы ВВ. Вышеописанные неоднородности обязательно присутствуют в качестве продуктов частичного распада и как посторонние включения внесенные на этапе производства ВВ. Процессы переноса и перераспределения энергии внутри образца затруднены, ввиду того, что за время облучения лазерным импульсом ($\tau_{\text{л}} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ с) тепло успевает распространиться на незначительное расстояние, по сравнению с размерами очагов. Ввиду этого энергия лазерного излучения локализуется в объеме поглощающих неоднородностей, что приводит к возникновению высокотемпературных очагов в их окрестности. Далее процесс развивается согласно общим представлениям об очаговом тепловом взрыве [9].

Во второй главе представлена методика экспериментальных исследований.

Рассматривается ключевое понятие для физики взрыва – ЭПИ ВВ, ЭПИ – значение энергии/мощности или их плотности отвечающее точке перегиба на кривой вероятности взрыва 50% (рис. 1) [6].

Описываются основные требования к регистрирующей аппаратуре, а также преимущества проекционного способа инициирования. Приводится описание экспериментальной установки, на основе схемы для определения

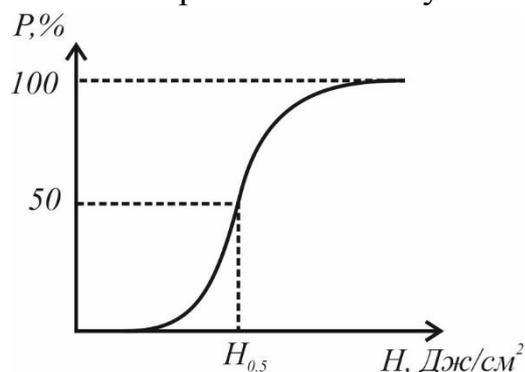


Рисунок 1 Вероятностная кривая инициирования.

кинетических параметров взрывного разложения ВВ (рис. 2).

В качестве инициирующего излучения использовалось излучение лазеров:

- YAG:Nd-лазер: 1 гармоника (1064 нм) и 4 гармоника (266 нм);
- CO₂-лазер (10 600 нм).

Излучение лазера попадало через полупрозрачное для излучения зеркало на диафрагму обрезающую центральную часть пучка. Таким

образом достигалось однородное распределение плотности энергии по сечению диафрагмы. Изображение этой диафрагмы строится в той же плоскости, в которой установлена поверхность облучаемого образца, что позволяло контролировать форму и однородность освещения образца. Фиксирование свечения производилось при помощи фотоэлектронных умножителей с наносекундным временным разрешением, как непосредственно из зоны воздействия (ФЭУ-1), при помощи использования той же оптической схемы, при помощи которой строилось изображение диафрагмы на образце, так и со всего образца – сверху (ФЭУ-2), снизу (ФЭУ-3). В зависимости от проводимых измерений в схему могли добавляться датчик давления, оптическая решетка, вакуумная камера, а также некоторые другие элементы. Контроль формы пучка во времени производился при помощи фотоэлемента коаксиального (ФЭК) с временным разрешением 0,1 нс. В качестве исследуемых образцов брались нитевидные кристаллы, а также прессованные нитевидные таблетки азидов свинца и серебра (давление прессования 5 000 кг/см², $\rho = 4,1$ г/см³).

В третьей главе описывается влияние длины волны лазерного излучения на энергетические пороги и индукционные периоды. Ставится задача по установлению зависимостей этих параметров от природы инициирующего излучения, которая в разных моделях оказывает разную роль. Воздействие проводилось CO₂ излучением: 10,6 мкм – средний ИК диапазон, энергия квантов составляет 0,1 эВ и переход электронов в валентную зону затруднен, а также 4 гармоникой неодимового лазера: 266 нм – УФ диапазон, энергия квантов чуть менее 5 эВ, поэтому облучение таким излучением моментально приводит к образованию электрон-дырочных пар.

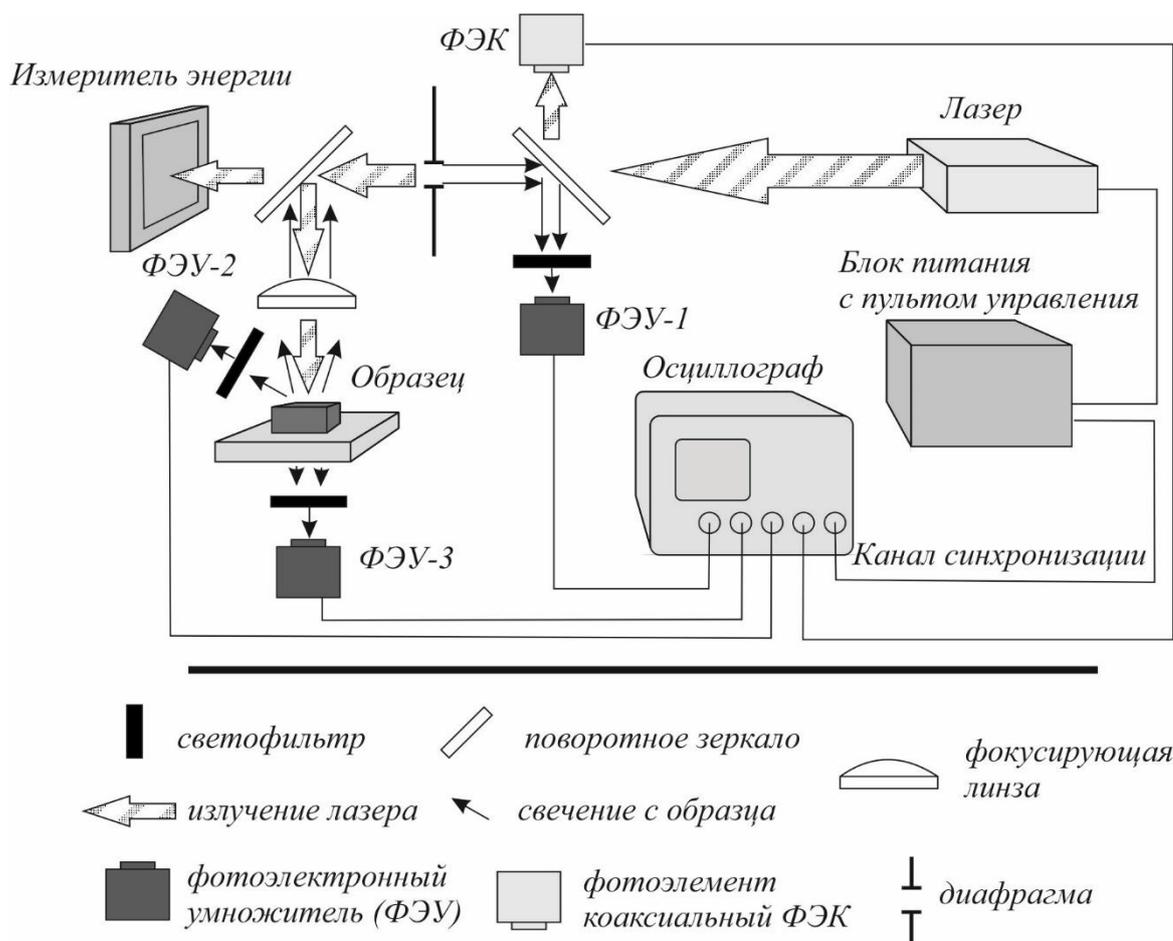


Рисунок 2 Упрощенная схема экспериментальной установки.

Для CO_2 излучения предварительно было определено пропускание кристаллических образцов азид свинца, толщиной 150 мкм. Установлено, что азид свинца прозрачен для излучения 10,6 мкм, показатель поглощения составляет $1 - 10 \text{ см}^{-1}$, азид серебра также достаточно прозрачен для ИК излучения. При этом выяснено, что на порошках азид свинца и азид серебра проявляется размерный эффект – зависимость порога инициирования по плотности энергии от диаметра зоны облучения, что объясняется различным уровнем средней пространственной освещенности и формированием спекл-структуры внутри образца с характерным размером спекла $l_0 \approx \frac{\lambda}{2\pi n_0}$, где λ – длина волны ЛИ. Оценка размера спекла дает значение $d_0 = 1,3 \text{ мкм}$.

Эффектами увеличения освещенности обуславливается низкие пороги инициирования. При облучении лазерным пучком $\text{Ø} 1 \text{ мм}$ прессованных таблеток азид свинца, пороги составили 20 мДж/см^2 , для азидов серебра 50 мДж/см^2 . При таких значениях порогов, температура разогрева матрицы $T = H_{0,5} \mu F$, где $\mu \sim 1 - 10 \text{ см}^{-1}$, F – коэффициент увеличения средней освещенности (не более 10), не превышает 10°C , что не может привести к зажиганию АТМ. Таким образом существование размерного эффекта и низкого порога инициирования указывает на то, что взрывное разложение

АТМ, при воздействии излучением CO₂-лазера, происходит в результате локализации энергии ЛИ и образования микроочагов с характерным размером 10⁻⁴ см. Индукционный период возникновения взрывной вспышки свечения от момента лазерного воздействия, обратно пропорционален величине превышения плотности энергии облучения над пороговой. При этом пороги на прессованных порошках азида серебра менее зависимы от превышения, а также размера пучка, чем на азидах свинца.

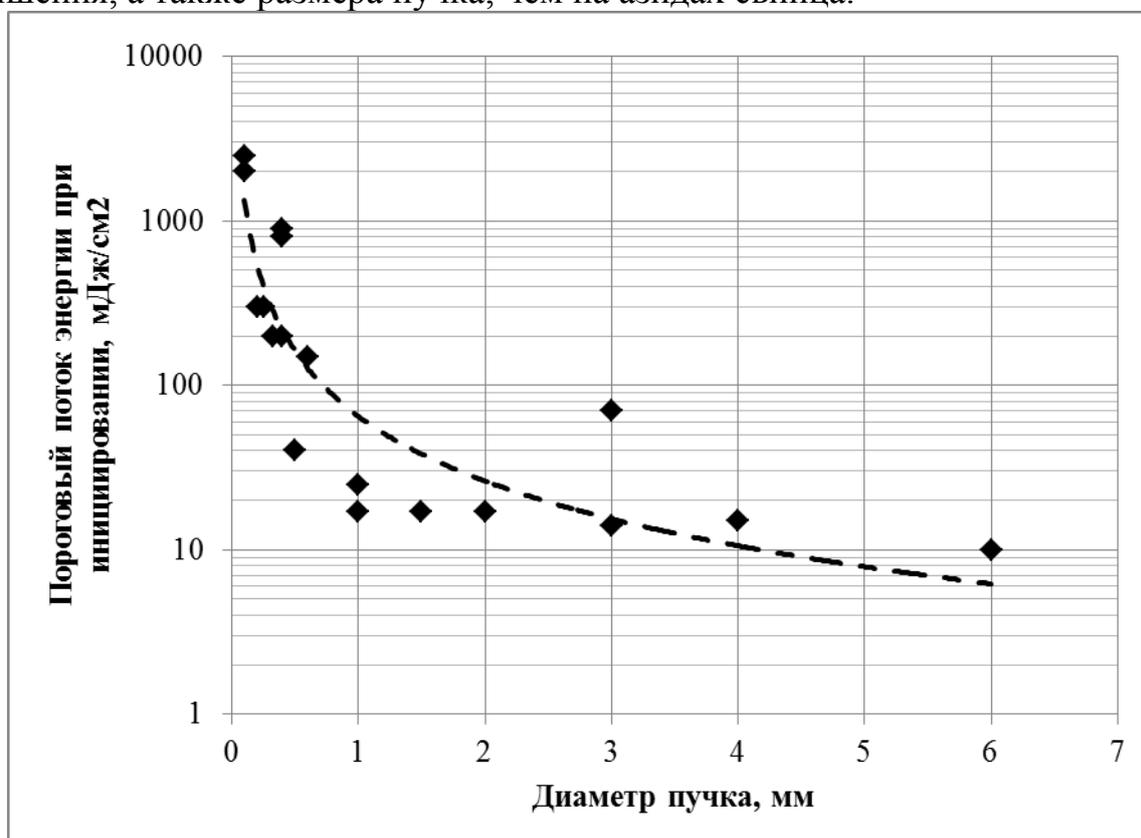


Рисунок 3 Размерный эффект на прессованной таблетке азидов свинца.

В предположении, что локализация энергии ЛИ в области прозрачности происходит в АТМ на поглощающих металлических включениях оценим температуру их нагрева. Данные оценок температуры для теплопроводящих сферических частиц приведены в таблице 1.

В УФ области спектра очаг формируется в приповерхностном слое ВВ и имеет плоскую конфигурацию. Иницирование азидов свинца и серебра на 4 гармонике неодимового лазера проводилось с открытой и закрытой поверхности подвергающейся облучению. Связано это с предполагаемой высокой газодинамической разгрузкой с поверхности образца, т.е. в момент облучения, за счет того, что излучение находится в УФ области и интенсивно поглощается матрицей, в тонком слое 1/μ происходит абляция поверхности. Пороги иницирования для образцов с открытой поверхностью соответствуют данным, полученным ранее в работе [10] и составляют:

1.6 ± 0.35 Дж/см² — для пластинчатых кристаллов AgN₃;

1.0 ± 0.3 Дж/см² — для нитевидных кристаллов AgN₃;

0.35 ± 0.1 и 0.7 ± 0.2 Дж/см² — для прессованных порошков AgN₃ и PbN₆

Индукционный период для таких режимов воздействия велик и составляет 300 – 400 нс на пороге инициирования.

Во второй серии опытов образец прижимался к кварцевой пластине под давлением 5000 кгс/см^2 . ЭПИ для исследованных образцов составили:

$10 \pm 5 \text{ мДж/см}^2$ – для пластинок AgN_3 ;

$10 \pm 2 \text{ мДж/см}^2$ – для прессованных порошков AgN_3 и PbN_6

Индукционный период составляет 50 – 100 нс.

По тепловой теории Франк-Каменецкого взрыв может произойти в том случае, если скорость выделения тепла при химической реакции будет превышать скорость теплоотвода в окружающую среду. Данное условие определяется параметром Франк-Каменецкого, который для реализации инициирования взрывной реакции должен быть больше определенной, для каждой геометрии величины $\delta > \delta_{\text{кр}}$. Сам параметр имеет следующий вид [9]:

$$\delta = \frac{Q}{\lambda} \cdot \frac{E}{RT_0^2} r^2 n A \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right),$$

где, Q – теплота реакции на моль, λ – коэффициент теплопроводности, r – определяющий геометрический размер очага, n – число молекул в единице объема, E – энергия активации, T_0 – начальная температура, R – универсальная газовая постоянная равная $8,3 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}$.

Анализ результатов показывает, что при всех способах инициирования (энергия кванта изменяется от 0,1 до 4,7 эВ) температура реакционноспособных очагов приблизительно одинакова. Проверка на критическое значение параметра Франк-Каменецкого $\delta > \delta_{\text{кр}}$ для очагов различной конфигурации показала их примерно одинаковую реакционную способность. Это обстоятельство указывает на тепловую микроочаговую природу лазерного инициирования АТМ во всех областях спектра лазерного воздействия.

Таким образом, инициирование, как в ИК области, так и в УФ, хорошо объясняется в рамках классической тепловой теории взрыва. В случае облучения пучком CO_2 лазера, инициирование происходит из горячих точек, в которых возникает локализации оптической энергии. Размеры этих неоднородностей по порядку величины соответствуют размеру $\sim 10^{-4} \text{ см}$. В случае инициирования 4 гармоникой причиной развития взрывной реакции является разогрев тонкого приповерхностного слоя, характерная толщина которого также составляет единицы микрон. Т.е. энергия локализуется в одном очаге микронной толщины. Ввиду этого большую роль на пороги инициирования влияет унос вещества с поверхности, а при инициировании в закрытой схеме, уход тепла происходит только в направлении образца и в прикрывающую пластину за счет теплопроводности, что приводит к уменьшению времени задержки по сравнению с теми случаями, когда микроочаги находятся в объеме и теплоотвод идет во все стороны.

А реальные пороги инициирования для CO_2 -лазера и 4 гармоник оказываются близкими к порогам инициирования 1 гармоникой неодимового лазера и для азиды свинца находятся в пределах $10 \pm 3 \text{ мДж/см}^2$. Что легко

описывается только в рамках тепловой модели инициирования, когда происходит локализация именно тепловой энергии.

Таблица 1. Оценка разогрева очагов при различном инициировании.

λ , нм	H , $\frac{\text{мДж}}{\text{см}^2}$	Формула для оценок	R_0 , мм	μ , см^{-1}	T , К
266	10	$T = \frac{H\mu F}{c\rho(\mu\sqrt{\alpha\tau} + 1)}$	10^{-5}	$\sim 10^5$	1000
1 064	8	$T = \frac{3HF}{4c\rho R_0} \left(\frac{R_0}{(R_0 + \sqrt{\alpha\tau})} \right)^3 k(\lambda, n, R_0)$	10^{-5}	10^{-2}	1400
10 600	20	$T = \frac{3HF}{4c\rho R_0} k(\lambda, n, R_0)$	10^{-4}	~ 10	1200
μ – показатель поглощения, $k(\lambda, n, r)$ – отношение реального сечения частицы к эффективному сечению поглощения (для рассматриваемых случаев $k \approx 0.7$)					

В четвертой главе описаны результаты измерений скорости распространения реакции разложения в нитевидных образцах АТМ. Впервые измерения скорости распространения фронта волны разложения в нитевидных кристаллах AgN_3 проведены в КемГУ под руководством Э.Д. Алукера [6]. С помощью скоростной съемки установлено, что средняя скорость фронта свечения (соответственно, разложения) составляет 1500 ± 300 м/с.

Таким образом, скорость распространения реакции оказалась значительно ниже скорости детонации в прессованных образцах 4,6 км/с [9], такой режим не является полноценно детонационным, а скорость реакции близка к низкоскоростным взрывным превращениям других ВВ [12]. Полученный результат авторы пытались объяснить с позиций цепной электрон-дырочной модели инициирования и распространения взрывного разложения АТМ. Поскольку такая гипотеза вызывает сомнения, для выявления механизма распространения фронта было принято решение – провести серию экспериментов, а именно:

1. Измерить скорость распространения фронта в нитевидных кристаллах при различных способах возбуждения очага разложения, обеспечивающих максимальную (в УФ области воздействий) и минимальную (в ИК области и передачей детонации) концентрацию электрон-дырочных пар.

2. Сравнить основные характеристики процесса возникновения и развития волны разложения в нитевидных кристаллах, обладающих, относительно высокой скоростью диффузии и нитевидных прессованных порошках где диффузия дырок затруднена.

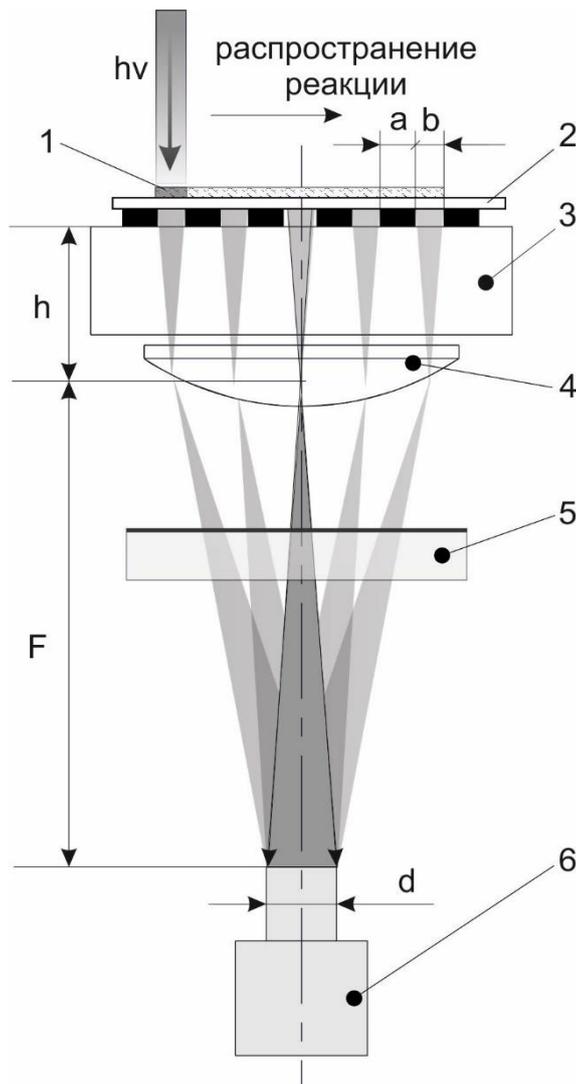


Рисунок 4 Схема для измерения скорости распространения фронта горения по образцу.

1 – образец; 2 – прозрачная подложка; 3 – стеклянная подложка с решеткой; 4 – фокусирующая линза; 5 – светофильтр, отсекающий лазерное излучение; 7 – оптическое волокно;

$h\nu$ – лазерное излучение;
 h – расстояние от решетки до главной плоскости линзы;
 F – фокусное расстояние линзы;
 d – диаметр волокна; a – непрозрачный промежуток решетки;
 b – прозрачный промежуток решетки.

Для измерения скорости фронта взрывного разложения использовалась усовершенствованная схема теневого метода (рис. 4). В эксперименте применялась плоская решетка, а разрешающая способность схемы определялась оптической схемой, таким образом, достигалось высокое пространственное разрешение 150 мкм. Для инициирования использовались три метода возбуждения: излучение CO_2 -лазера, излучение 4 гармоники YAG:Nd-лазера, а также детонационная волна, созданная инициированием отдельного образца.

Типичные осциллограммы импульсов свечения на входе решетки с периодом 1 мм приведены на рис. 5. Полученные осциллограммы одинаково характерны для всех способов возбуждения. На рис. 8 приведены значения скоростей распространения фронта взрывного разложения, полученные при обработке осциллограмм. Выявлено, что графики распределения скорости по длине образца различны для кристаллов и прессованных порошков и типичны для всех способов возбуждения.

Выявлено, что средняя скорость распространения фронта свечения по образцам кристаллов не зависит от метода инициирования и составляет $1,6 \pm 0,5$ км/с, при этом скорость по длине кристалла колеблется в широких пределах от 1 до 3 км/с. В прессованных порошках же скорость реакции

взрывного разложения более стабильна, а величина составляет $4,6 \pm 0,3$ км/с, что близко к стационарной развитой скорости детонации. С точки зрения тепловой модели развития и распространения волны разложения эта ситуация вполне объяснима. Скорость фронта лимитируется скоростью химической реакции на фронте сжатия, которая выше в диспергированном веществе. При движении взрывного разложения по НК необходимо дробление вещества на фронте детонации, на что уходит часть энергии и что замедляет процесс распространения. При движении по ПП ситуация другая. Здесь вещество уже находится в раздробленном состоянии (в указанном выше смысле), скорость разложения высока, а скорость фронта может достигать максимальных величин для АТМ.

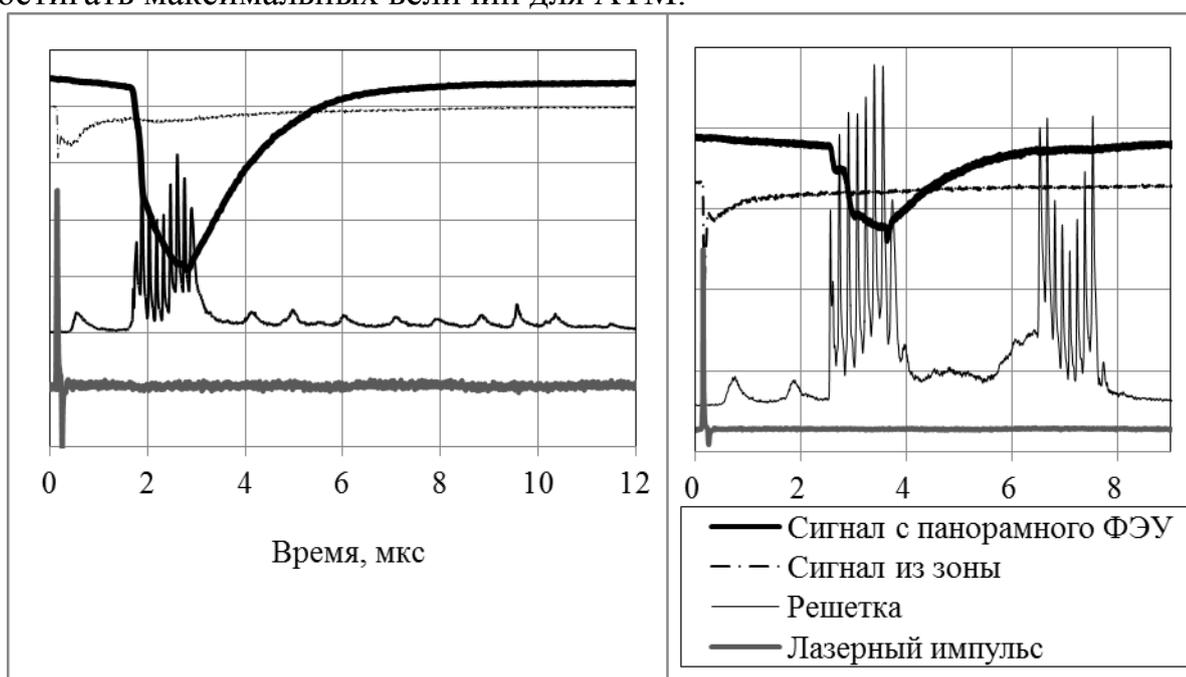


Рисунок 5 Осциллограмма инициирования детонационной волной разложения прессованной таблетки: слева – кристалла AgN_3 , справа – прессованной таблетки AgN_3 . По вертикальной оси – относительная амплитуда сигналов.

В ходе исследований обнаружен важный для физики горения и взрыва факт. В прессованных образцах азидов свинца и серебра детонационный режим возникает не сразу после возбуждения взрывного разложения, а через некоторое время и на достаточно большом расстоянии от очага разложения (рис. 6). Режиму детонации предшествует режим быстрого горения со скоростью 1 км/с, затем режим детонации с малой скоростью около 2 км/с.

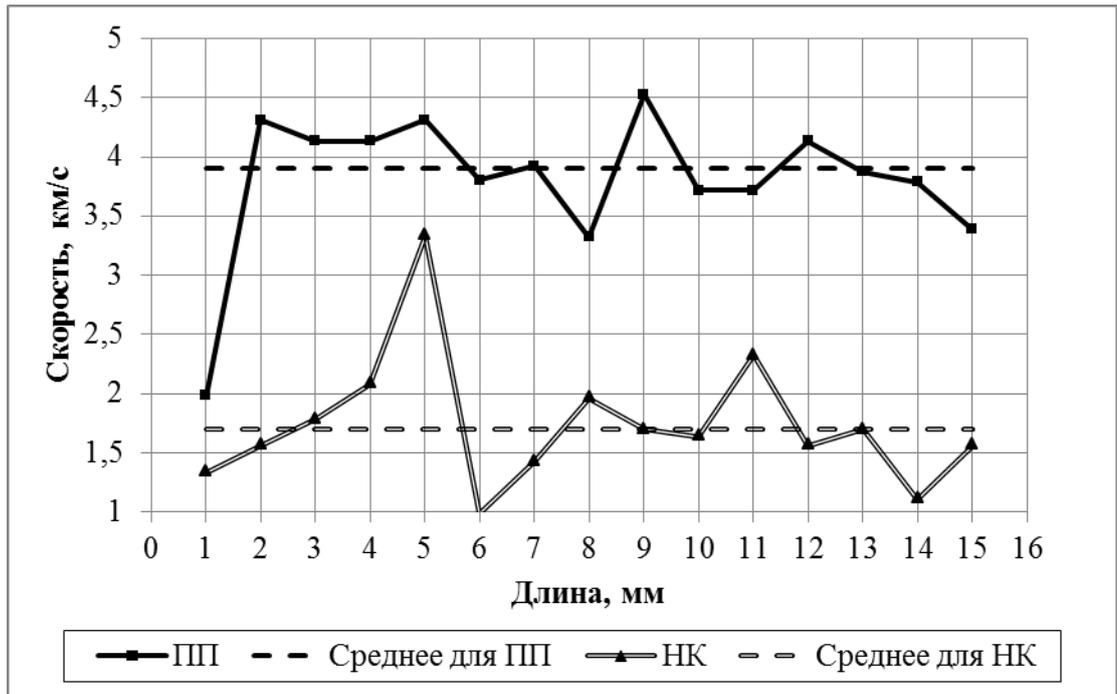
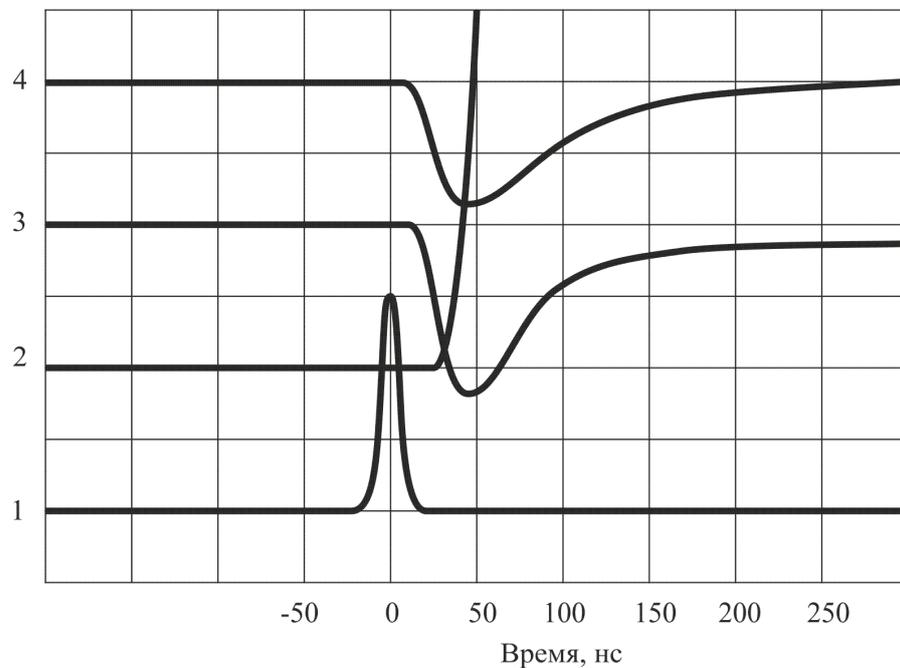


Рисунок 6 Значение скоростей распространения свечения по образцам.

Пятая глава посвящена определению скорости разлета продуктов взрывного разложения на воздухе и в условиях вакуума. С этой целью над облучаемой поверхностью ВВ устанавливались три прозрачные преграды на различных от неё расстояниях. Моменты соударения продуктов с преградами фиксировались путем регистрации вспышек (импульсов) свечения. Для установления соответствия сигнала свечения моменту разлета ВВ, проводился эксперимент с датчиком давления. На рисунке 7 показана



1 – ЛИ; 2 – сигнал датчика давления;
3 – сигнал панорамного ФЭУ; 4 – сигнал зонного ФЭУ

Рисунок 7 Осциллограмма свечения и датчика давления при иницировании.

осциллограмма, полученная при воздействии лазерным излучением на кристалл азида серебра размером 1,5x1,5 мм. Как видно из осциллограммы сигнал свечения с образца соответствует сигналу давления с датчика с точностью до 10 нс.

В результате проведенных экспериментов по изучению скорости разлета продуктов, получены следующие важные результаты:

- Начало разлета продуктов с точностью до 10 нс совпадает с появлением импульса свечения взрывного разложения, что указывает на тепловую природу свечения и отсутствие обсуждаемого в литературе явления «предвзрывной люминесценции», на основании которого строились цепные модели лазерного инициирования;

- Начальная скорость разлета продуктов разложения (3 км/с для кристаллов и 5 км/с для порошков) и характер её поведения различны для кристаллов и порошков. Это подтверждает предположение о дроблении нитевидных кристаллов и частичном разлете раздробленных частичек в процессе взрывного разложения и формирования детонационного фронта.

Таким образом, полученные результаты могут получить объяснение в рамках тепловой модели инициирования. Результаты измерения скорости противоречат данным [2]. Время начала разлета продуктов (20 нс) принято нами как характерное время химической реакции, протекающей в первоначальном объеме ВВ. Это исключает наблюдение каких-либо предвзрывных явлений в значении [11].

В заключении результаты исследований обобщены в виде выводов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены энергетические пороги инициирования кристаллов и порошков АТМ на длинах волн 266 нм, 1064 нм и 10 600 нм, в одних и тех же условиях эксперимента, составляют соответственно 20, 10 и 20. Во всех случаях инициирование является низкопороговым и оно возможно только в результате локализации энергии ЛИ с образованием высокотемпературных микроочагов в объеме образцов.
2. Сделаны оценки средней температуры очагов при пороговых уровнях воздействия. Показано, что во всем исследуемом спектральном диапазоне воздействий, температура очагов примерно одинакова и составляет ~1200 К, т.е. процесс взрывного разложения происходит примерно в одинаковых условиях. Используя параметр Франк-Каменецкого проведена оценка

реакционной способности тепловых микроочагов. Результат оценки положительный.

3. Получены данные по длительности индукционного периода при пороговых уровнях лазерного воздействия и уровнях, превышающих пороговые. Результаты исследования подтверждают вывод п. 3.
4. Измерены скорости распространения фронта волны взрывного разложения в нитевидных кристаллах и нитевидных прессованных порошках АТМ. При возбуждении на длинах волн 266, 1064 и 10 600 нм, а также при возбуждении передачей детонации через воздушную прослойку. Показано, что при всех способах возбуждения, поведение АТМ одинаково, а именно:
 - В нитевидных кристаллах формируется нестационарный режим распространения детонации с малой скоростью (около 1,5 км/с) с разбросом значений от точки к точке по длине кристалла до 100%;
 - В нитевидных прессованных порошках формируется стационарный режим распространения детонации со скоростью 4,5 км/с и разбросом не более 10%.

Показано, что наблюдаемые различия не имеют объяснения с позиций цепной электрон-дырочной модели, но достаточно просто объясняются с позиций тепловой модели.

5. Обнаружено существование преддетонационного участка при иницировании АТМ.
6. Измерены скорости разлета продуктов взрывного разложения кристаллов и порошков АТМ в различные моменты времени в вакууме и атмосфере воздуха.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. A. Razin – Initiation of PETN Explosive Decomposition by CO₂ Laser – Razin A., Tsipilev V., Yakovlev A., Damamme G., Malys D. // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 11/3. - С. 168-170
2. A. Razin – Explosive Decomposition of FTDO Initiated by Laser Radiation Pulse and Pulse of Accelerated Electrons – Oleshko V., Tsipilev V., Lysyk V., Razin A., Zarko V., Kalmykov P. // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 11/3. - С. 153-156
3. A. Razin – Initiation of Detonation of Heavy Metal Azides by CO₂ Laser – Razin A., Tsipilev V., Morozova E. // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 11/3. - С. 171-172
4. A. Razin – On the Question of Predetonation Stage of Explosive Decomposition of Heavy Metal Azides – Tsipilev V., Razin A., Lisitsyn

- V., Damamm Z., Malis D. // Известия вузов. Физика. - 2012 - Т. 55 - №. 11/3. - С. 235-238
5. A. Razin – Effect of laser radiation wavelength on explosives initiation thresholds – R. Akhmetshin, A. Razin, V.Ovchinnikov, A. Skripin, V. Tsipilev, V. Oleshko, V. Zarko, A. Yakovlev // J. Phys.: Conf. Ser., vol. 552, i. 1, 01 2015 (2014)
 6. А. Разин – Исследование размерного эффекта при лазерном импульсном инициировании ФТДО и смесевых составов на его основе – Ахметшин Р.Г., Разин А.В., Зарко В.Е., Ципилев В.П., Калмыков П.И. // Известия вузов. Физика. – 2014 – Т. 57 – № 12/3 – С. 94 – 99
 7. А. Разин – Распространение фронта взрывного разложения в нитевидных образцах АТМ при лазерном импульсном инициировании в различных областях спектра – Разин А.В., Ахметшин Р.Г., Ципилев В.П. // Известия вузов. Физика. – 2014 – Т. 57 – № 12/3 – С. 181 – 185
 8. А. Разин – Пространственно-временные характеристики волны распространения детонации в азиде серебра – Каленский А.В., Звеков А.А., Ананьева М.В., Кригер В.Г., Ципилев В.П., Разин А.В. // Физика горения и взрыва. – 2015 – т. 51 - № 3 – С. 76 – 81

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е.И., Вознюк А.Г. Иницирование азидов свинца лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1978. Т.14, №4. С. 86-91.
2. Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Митрофанов А.Ю. Распространение цепной реакции взрывного разложения в кристаллах азидов серебра // Физика горения и взрыва. 2003. Т.39, №6. С. 104-106.
3. Кригер В.Г., Каленский А.В., Звеков А.А., Боровикова А.П., Гришаева Е.А. Определение ширины фронта волны реакции взрывного разложения азидов серебра // Физика горения и взрыва. 2012. №4. С. 129-136.
4. Медведев В.В. Взрывное разложение слабопрессованных порошков азидов свинца в широком диапазоне длительностей воздействия лазерного импульса // Физика горения и взрыва. 2008. Т.44, № 5. С. 98-100.
5. Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. К вопросу о кинетике и механизме взрывного разложения азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. 2006. Т.42, №1. С. 106-119.

6. Александров Е.И., Ципилев В.П. Размерный эффект при инициировании прессованного азид свинца лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. 1981. №5 С.77-81
7. Ципилев В.П. Стенд для исследования кинетики взрывного разложения конденсированных сред при воздействии импульсов лазерного излучения // Известия ТПУ. 2003. №4. С.99-103.
8. Журавлев Ю.Н., Лисицын В.М. Изучение реакционной способности азид серебра по данным зонных расчетов в рамках теории функционала плотности // Химическая физика, 2014, Т. 33, №3, С. 3 – 12.
9. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых веществах // Издательство иностранной литературы – Москва – 1962.
10. Лисицын В.М., Ципилев В.П., Дамам Ж., Малис Д. Влияние длины волны лазерного излучения на энергетический порог инициирования азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, №5. С. 106 – 115.
11. Скрипин А.С., Ципилев В.П. Кинетические характеристики процесса взрывного разложения азидов тяжелых металлов при лазерном импульсном возбуждении // Изв. вузов. Физика. – 2009. №8/2. – С. 316 – 319.
12. Беляев А.Ф., Боболев В.К. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв // «Наука» – Москва – 1973. С. 143.