



004609896

На правах рукописи

ДУГИНОВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ТЭНА
ЛАЗЕРНЫМ И ЭЛЕКТРОННЫМ ИМПУЛЬСАМИ**

Специальность 02.00.04. – "Физическая химия"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

- 7 ОКТ 2010

Кемерово – 2010

Работа выполнена на кафедре теоретической физики ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ханефт Александр Вилливич

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Адуев Борис Петрович

доктор физико-математических наук, доцент
Каленский Александр Васильевич

Ведущая организация ГОУ ВПО, Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, (г.Томск)

Защита диссертации состоится « 15 » октября 2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.088.03 при ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет» по адресу: 650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»

Автореферат разослан «13» 09 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.088.03

доктор физико-математических наук, профессор



Кречетов А.Г.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последние годы возобновился интерес к изучению инициирования конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), пиротехнических составов на их основе и твердых ракетных топлив лазерным и электронным импульсами. Этот интерес возник, во-первых, в связи с возросшими возможностями современной аппаратуры для регистрации и получения информации о быстропотекающих процессах, происходящих в энергетических материалах в индукционном периоде, таких, например, как импульсная люминесценция, импульсная проводимость, а также свечение и проводимость плазмы, образующиеся в момент взрыва. Эти данные необходимы для разработки механизма инициирования энергетических материалов, для изучения гидродинамики разлета, образующейся во время взрыва плазмы. Во-вторых, это связано с тем, что лазеры стали применять для детонации взрывчатых веществ в так называемых светодетонаторах, помехозащищенность которых намного больше, чем у электродетонаторов.

Наиболее интенсивно в последние годы изучается инициирование тетранитропентаэритрита (ТЭН) лазерным и электронными пучками в Кемеровском государственном университете и Томском политехническом университете. ТЭН является высокобризантным ВВ, имеющим обширное практическое применение в ряде технических и прикладных задач. Использование данного ВВ на практике требует детального изучения процесса его инициирования: мощное импульсное излучение лазера, импульс электронов, удар или нагрев. Существует несколько точек зрения на процесс инициирования ТЭНа лазерным и электронным импульсами, основными из которых являются тепловой взрыв и электрический пробой. Следовательно, выяснение механизма инициирования ТЭНа лазерным и электронным импульсами является актуальной задачей.

Моделирование инициирования ТЭНа лазерным импульсом проводилось примерно тридцать лет назад. Однако в данных работах не учитывалась возможность зависимости коэффициента поглощения от температуры, влияние термоупругих напряжений, возникающих в кристалле при импульсном нагреве на порог инициирования. К тому же инициирование ТЭНа производят через прозрачную подложку (лазерное стекло), а это не учитывалось в данных работах при численном моделировании. Моделирование инициирования ТЭНа электронным импульсом не проводилось вообще.

Учет зависимости коэффициента поглощения от температуры, влияние термоупругих напряжений на энергию активации химической реакции приводит к образованию обратной связи в механизме зажигания и инициирования конденсированных ВВ. Эта обратная связь может быть как положительной, так и отрицательной, что позволяет направленно регулировать чувствительность ВВ к воздействию лазерного или электронного импульса.

В силу сложности и неизвестности химических процессов, протекающих в органических ВВ при воздействии лазерного или электронного импульсов, первым шагом на пути исследования является модель инициирования ВВ с реакцией нулевого порядка, в которой будет учитываться обратная связь в виде зави-

симости коэффициента поглощения от температуры, термоупругие напряжения, а также плавление. Сама по себе эта задача уже является достаточно сложной.

Целью настоящей работы явилось проведение систематических численных исследований по инициированию ВВ лазерным и электронным импульсами, выяснением роли плавления, термоупругих напряжений, подложки, зависимости коэффициента поглощения от температуры, а также радиуса светового пучка на порог инициирования.

Для достижения цели работы потребовалось решить следующие задачи:

1. Получить аналитические критерии для оценки порога зажигания ВВ коротким лазерным импульсом с учетом диаметра светового пучка, плавления и зависимости коэффициента поглощения от температуры;

2. Разработать комплекс программ для решения задач зажигания конденсированных ВВ лазерным и электронным импульсами с учетом плавления, термоупругих напряжений и учета зависимости энергии активации от упругих напряжений.

Научную новизну работы составляют:

1. Критерий зажигания конденсированных ВВ коротким лазерным импульсом, учитывающий влияние диаметра светового пучка, зависимость коэффициента поглощения от температуры и плавление ВВ на порог инициирования;

2. Роль термоупругих напряжений при инициировании ВВ лазерным импульсом через подложку;

3. Размерный эффект – зависимость времени задержки инициирования ВВ электронным импульсом от толщины кристалла;

4. Порог инициирования ТЭНа лазерным и электронным импульсами определяется экзотермической реакцией нулевого порядка.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Критерий зажигания конденсированных взрывчатых веществ коротким лазерным импульсом учитывающий диаметр светового пучка, плавление и зависимость коэффициента поглощения от температуры;

2. Влияние термоупругих напряжений на инициирование ВВ лазерным импульсом через прозрачную подложку;

3. Влияние термоупругих напряжений на время задержки инициирования ВВ электронным импульсом;

4. Порог инициирования ТЭНа лазерным и электронным импульсами определяется тепловой моделью с реакцией нулевого порядка.

Научная и практическая значимость работы. Показано, что при инициировании ВВ лазерным импульсом термоупругие напряжения, проходя через границу раздела подложка – ВВ, влияют на энергию активации экзотермической реакции и как следствие на порог инициирования.

Критерии инициирования ВВ с температурой плавления ниже температуры зажигания коротким лазерным импульсом может быть использован на практике.

Комплекс программ, разработанный для решения системы уравнений связанной термоупругости, может быть использован для моделирования процессов зажигания и распространения термоупругих волн, и для других конденсированных взрывчатых веществ.

Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов, достигается установлением границ полученных формул и использованием апробированных и хорошо зарекомендовавших себя численных методов. Полученные результаты находятся в удовлетворительном качественном и количественном согласии с имеющимися экспериментальными данными.

Личный вклад. Постановка задачи и определение направлений исследования были проведены совместно с научным руководителем. Разработка программного обеспечения и проведение численных расчетов проведено автором. Результаты численного моделирования обсуждались непосредственно с научным руководителем. В работах, опубликованных с соавторами, автору принадлежат результаты, сформулированные в защищаемых положениях и выводах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 10-ой международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах» (Кемерово, 2007); Energetic Materials: 38th, 39th, 40th International Annual Conference of ICT (Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 2007, 2008, 2009); Хаос и структуры в нелинейных системах, теория и эксперимент (Казахстан, Астана, 2008); X Международной школе-семинаре «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» (Барнаул, 2008); VI Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2008); 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Томск, 2008); VI Международной научной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2008); XIV Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 2008); The 3rd International symposium on Energetic Materials and their Applications (Tokyo, Japan, 2008); Всероссийской научно-практической конференции «Исследования и достижения в области теоретической и прикладной химии» (Барнаул, 2008, 2009); конференции «Современные проблемы химической и радиационной физики» (Москва, 2009); Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials (Republic of Kazakhstan.- Astana); Современная баллистика и смежные вопросы механики: Всероссийская научная конференция, посвященная 100 - летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя Томской школы баллистики. (Томск, 2009).

Публикации: по теме диссертации опубликованы 23 работы, в том числе 4 статьи опубликованы в российских научных журналах из списка ВАК.

Работа выполнялась в соответствии с планами НИР Кемеровского государственного университета по заданию федерального агентства образования №2.9.08 «Исследование колебательного и электронного строения, фазовых переходов в рядах алмазоподобных полупроводников, термодинамически лабильных и суперионных диэлектриках, наноструктурах на их основе» (2008-2012

гг.) и программой «Развитие научного потенциала высшей школы» №2.1.1/1230, 2009-2010 гг.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, а также списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 118 страниц текста и содержит 6 таблиц, 65 рисунков. Библиографический список включает 131 наименование.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, представлены защищаемые положения, достоверность и апробация работы.

В первой главе приведен литературный обзор, в котором рассмотрены теплофизические и кинетические параметры ТЭНа, его механические и оптические свойства. Рассмотрены экспериментальные результаты по иницированию ТЭНа лазерным импульсом, а также система: прозрачная подложка – ТЭН. Приведены экспериментальные результаты по иницированию ТЭНа электронным импульсом наносекундной длительности. Порог иницирования ТЭНа электронным импульсом составляет порядка 15 Дж/см^2 [1-3].

Во второй главе проведено численное моделирование иницирования конденсированного ВВ лазерным импульсом. Рассмотрено влияние зависимости коэффициента поглощения от температуры на критическую энергию зажигания конденсированного вещества лазерным импульсом, а также плавление вещества. Расчеты проведены при различных радиусах лазерного пучка и длительности лазерного импульса. Получен приближенный критерий иницирования конденсированного вещества коротким лазерным импульсом с учетом плавления, зависимости коэффициента поглощения от температуры и диаметра светового пучка.

В первом разделе решено численно уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат с учетом зависимости коэффициента поглощения от температуры и гауссовым распределением интенсивности по сечению пучка:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \alpha(1-R)I_0(t) \exp \left(- \int_0^z \alpha dz' - \frac{r^2}{r_0^2} \right) + qK_0 \exp \left(- \frac{E}{k_B T} \right). \quad (1)$$

Здесь λ , c – коэффициент теплопроводности и теплоемкость вещества; ρ – плотность вещества; q , K_0 , E – тепловой эффект реакции, предэкспонент и энергия активации скорости разложения, соответственно; k_B – постоянная Больцмана; R – коэффициент отражения; r_0 – характерный радиус гауссова пучка; $I_0(t)$ – плотность потока энергии в центре пучка. Внешний теплоотвод не учитывался. Полагалось, что длительность лазерного импульса и время задержки зажигания значительно меньше времени внешнего теплоотвода.

Получен критерий зажигания ВВ коротким лазерным импульсом с учетом зависимости коэффициента поглощения от температуры:

$$z_1 q K_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T_m}\right) = \lambda \frac{\Delta T_m}{F(\gamma)[1 - \beta \Delta T_m / (\alpha F(\gamma))]} \left(\alpha + \frac{4z_1}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

$$W^*(\alpha(T_m)) = \frac{c\rho\Delta T_m}{\alpha(T_m)(1-R)}, \quad (3a) \quad \bar{W}^* = \frac{W^*(\alpha(T_m)) + W^*(\alpha_0)}{2}, \quad (3b)$$

где r_1 и z_1 – радиус и толщина реакционного объема; T_m – температура поверхности ВВ. Здесь $F(\gamma) = (1 + \gamma)/(1 - \gamma T_0/\Delta T_m)$; $\beta = \partial\alpha(T_m)/\partial T$; $\gamma = k_B T_m/E$; $\Delta T_m = T_m - T_0$.

Результаты численного расчета зависимости критической плотности энергии W^* зажигания ВВ от радиуса пучка лазерного импульса приведены на рис. 1 (кривые 1 – 3). Аппроксимация зависимости коэффициента поглощения от температуры выбрана линейной: $\alpha = \alpha_0 - \beta(T - 300)$ см⁻¹. Видно, что если α зависит от T , то в случае $\beta > 0$ (кривая 3) критическая плотность энергии лазерного импульса уменьшается, а зависимость ее от радиуса пучка становится более полой относительно кривой (1). В случае $\beta < 0$ (кривая 2) W^* наоборот увеличивается, а зависимость W^* от радиуса пучка становится более резкой.

На рис. 1 изображены результаты расчета критической плотности энергии лазерного импульса по формулам (2), (3б) (точки 4 – 6). Как видно из данного рисунка, результаты расчетов W^* по формулам и численно достаточно хорошо совпадают.

Во втором разделе решено численно уравнение теплопроводности с учетом плавления ВВ:

$$\rho[c + H_f \delta(T - T_f)] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \alpha(1-R) I_0(t) \exp\left(-\alpha z - \frac{r^2}{r_0^2}\right) + q K_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right).$$

Здесь H_f – скрытая теплота плавления.

На рис. 2 представлены результаты расчета динамики температуры ΔT_s на поверхности ВВ ($z = r = 0$) вблизи порога зажигания при воздействии лазерного импульса длительностью 40 нс и радиусом светового пучка $r_0 = 10^{-1}$ см. «Полочки» на рис. 2 при $\Delta T_s = 113$ К обусловлены плавлением ВВ.

На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости критической плотности энергии лазерного импульса длительностью $\tau_i = 40$ нс от радиуса пучка с учетом плавления (кривая 2). Как видно из сравнения двух кривых (рис. 3), плавление повышает критическую плотность энергии инициирования ВВ. Из закона сохранения энергии получено выражение для расчета критической плотности энергии лазерным импульсом, в котором T_m вычисляется из решения трансцендентного уравнения (2):

$$W^* = \frac{c\rho\Delta T_m}{\alpha(1-R)} + \frac{\rho H_f}{\alpha(1-R)}. \quad (4)$$

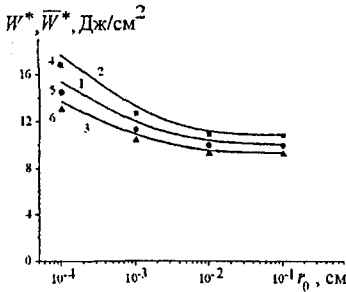


Рис.1. Влияние радиуса светового пучка лазерного импульса на критическую плотность энергии зажигания ВВ при различных зависимостях коэффициента поглощения от температуры: кривые 1, 2, 3, численное решение уравнения (1), точки 4, 5, 6 – расчет по критерию (2, 4 – $\beta = -0,1 \text{ см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; 1, 5 – $\beta = 0$; 3, 6 – $\beta = 0,1 \text{ см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$).

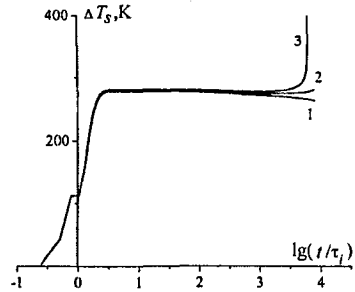


Рис.2. Зависимость температуры поверхности образца в начале координат от времени при $W = 16,3$ (1), $16,4$ (2) и $16,5 \text{ Дж/см}^2$ (3).

На рис.4 представлены результаты расчета пороговой энергии ($E^* = \pi r_0^2 W^*$) инициирования ТЭНа по формулам (2), (4). Как видно из рис.4, результаты расчетов согласуются с экспериментом [3] при $\alpha = 0,065 \text{ см}^{-1}$.

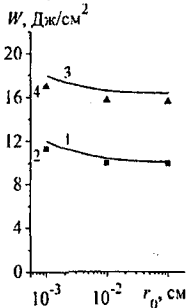


Рис.3. Влияние радиуса светового пучка лазерного импульса на критическую плотность энергии зажигания ВВ: кривая 1 – без учета плавления, кривая 2 – с учетом плавления, ■ – расчет по критерию.

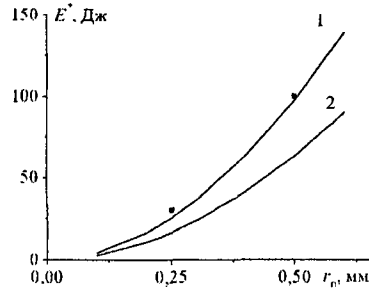


Рис.4. Влияние радиуса светового пучка лазерного импульса на критическую энергию инициирования ТЭНа: линия – расчет ($\alpha = 0,065$ (1); $0,1 \text{ см}^{-1}$ (2)), точки – эксперимент [3].

В третьей главе проведено численное моделирование зажигания конденсированного ВВ лазерным импульсом на основе решения системы уравнений связанной термоупругости при $\alpha = 150 \text{ см}^{-1}$. Рассмотрено влияние активационного объема, испарения, плавления, а также кварцевой подложки, прикрывающей ВВ, на порог инициирования.

В первом разделе численно решено одномерное уравнение теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 3\alpha_s K T_0 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \alpha(1-R)I(t) \exp(-\alpha x) + qK_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

совместно с волновым уравнением для термоупругих напряжений

$$c_s^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = 3\alpha_s K \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}.$$

Уравнения решались при следующих начальных и граничных условиях:

$$T(x,0) = T_0, \quad \sigma(x,0) = \sigma(h,t) = 0, \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -j_s L, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} = 0, \quad \left. \frac{\partial \sigma}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad \sigma(0,t) = -p.$$

Здесь: h – толщина образца; j_s – поток испаряющихся частиц с поверхности ВВ; L – теплота испарения; c_s – адиабатическая скорость звука; $\sigma \equiv \sigma_x$ – напряжение вдоль нормали к поверхности; K – модуль всестороннего сжатия; α – коэффициент линейного расширения; p – давление испаряющихся частиц; ε – деформация твердого тела.

Зависимость энергии активации экзотермической реакции задавалась в виде линейной функции от упругого напряжения: $E(x,t) = E_a + \sigma(x,t)\Delta V^*$, где E_a – энергия активации термического разложения ВВ при $\sigma = 0$; ΔV^* – активационный объем.

Согласно обобщенному закону Гука в твердом теле также возникают поперечные термоупругие напряжения.

$$\sigma_c \equiv \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \lambda_s \varepsilon_{xx} - 3\alpha_s K(T - T_0),$$

где λ_s – коэффициент Ламэ. В работе вычислялась x – компонента деформации твердого тела и смещение частиц:

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_{xx} = \frac{1}{\rho c_s^2} [\sigma + 3\alpha_s K(T - T_0)], \quad u(x) = \int_0^x \varepsilon(x) dx.$$

Динамическое давление испаряющихся молекул ВВ вычислялось по формуле $p = m u_s j_s$, где m – масса молекул; u_s – скорость испаряющихся с поверхности твердого тела молекул; $j_s = j_0 \exp(-L/k_B T_s)$.

На рис.5 приведена динамика распределения продольных термоупругих напряжений при допороговой плотности энергии лазерного импульса, равной $W = 10$ Дж/см². Как видно из рис.5, в начальный момент времени возникают напряжения сжатия ($\sigma < 0$), которые, двигаясь в правую часть образца, переходят в волны растяжения ($\sigma > 0$). Далее волна растяжения двигается обратно и переходит в волну сжатия.

На рис.6 приведены результаты расчета смещения тыльной поверхности образца при разных длительностях лазерного импульса. Смещение тыльной поверхности носит колебательный характер. Период колебаний зависит от толщины кристалла $\tau = 2h/c_s$. При $h = 1$ мм период $\tau \approx 860$ нс.

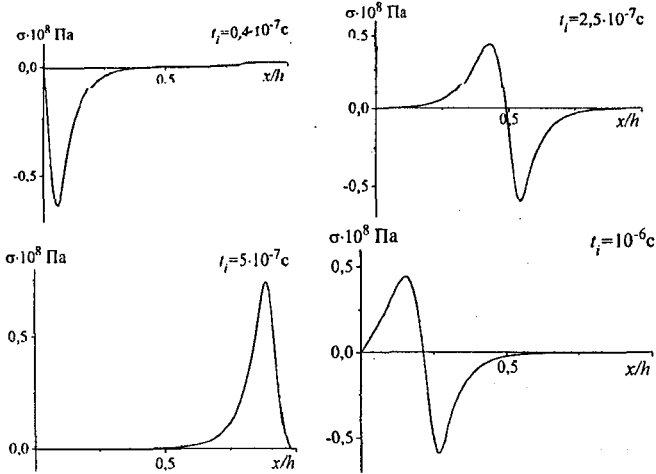


Рис.5. Динамика распределения нормальных термоупругих волн напряжения по толщине кристалла.

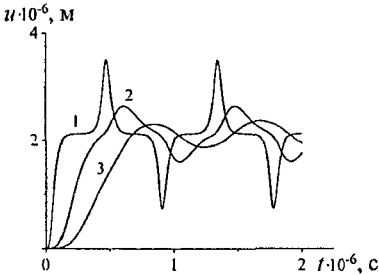


Рис.6. Влияние длительности лазерного импульса на форму акустического сигнала: $\tau_l = 40$ (1), 200 (2), 400 нс (3), $W = 10$ Дж/см².

Длительность лазерного импульса влияет на форму акустического сигнала (рис.6). Чем больше длительность лазерного импульса, тем больше происходит «расплывание» акустического сигнала и меньше его амплитуда. «Расплывание» акустического сигнала обусловлено диффузией тепла из зоны поглощения. Увеличение длительности лазерного импульса приводит также и к уменьшению амплитуды термоупругих напряжений и деформаций.

Во втором разделе при решении системы уравнений связанной теплопроводности учитывалось плавление ВВ:

$$\rho[c + H_f \delta(T - T_f)] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 3\alpha_l K T_0 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \alpha(1 - R) I(t) \exp(-\alpha x) + q K_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right),$$

$$c_s^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = 3\alpha_l K \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}.$$

На рис.7 приведена динамика распределения продольных термоупругих напряжений при допороговой плотности энергии лазерного импульса. Плавление искажает динамику распределения волн напряжения и деформации.

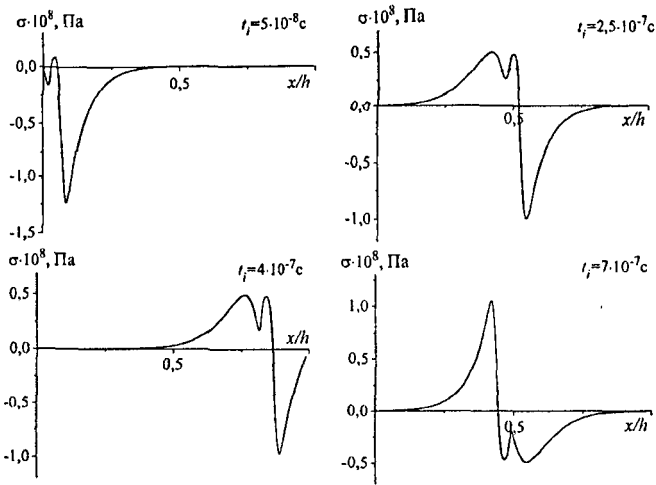


Рис. 7. Динамика распределения нормальных термоупругих волн напряжения по длине кристалла при $W = 15 \text{ Дж/см}^2$.

В третьем разделе рассмотрена роль подложки при инициировании ВВ лазерным импульсом.

Для этого решалась численно система уравнений связанной термоупругости как для подложки, так и для ВВ с соответствующими граничными условиями (индекс 1 – подложка, 2 – ВВ):

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + 3\alpha_{t1} K_1 T_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial t}, \quad s_1^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{3\alpha_{t1} K_1}{\rho_1} \frac{\partial T_1}{\partial x},$$

$$\rho_2 [c_2 + H_f \delta(T_2 - T_f)] \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + 3\alpha_{t2} K_2 T_0 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x \partial t} + \alpha(1-R)I(t)e^{-\alpha x} + qK \left(-\frac{E}{k_B T_2} \right),$$

$$s_2^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \frac{3\alpha_{t2} K_2}{\rho_2} \frac{\partial T_2}{\partial x}.$$

Численное моделирование инициирования ВВ через кварцевую подложку проводилось при различных плотностях энергии лазерного импульса. Как видно из рис.8, напряжение при наличии подложки на левой границе не равно нулю. Изменение температуры на границе раздела подложка – ВВ носит колебательный характер (рис.9 и 10). Появление «зазубринок» на температурных зависимостях обусловлено тем, что в системе связанных уравнений термоупругости имеется обратная связь. Волны напряжения, проходя через гетеросистему, влияют на экзотермическую реакцию, скорость которой максимальна вблизи границы раздела подложка – ВВ. Причем порог инициирования снижается не зависимо от знака активационного объема.

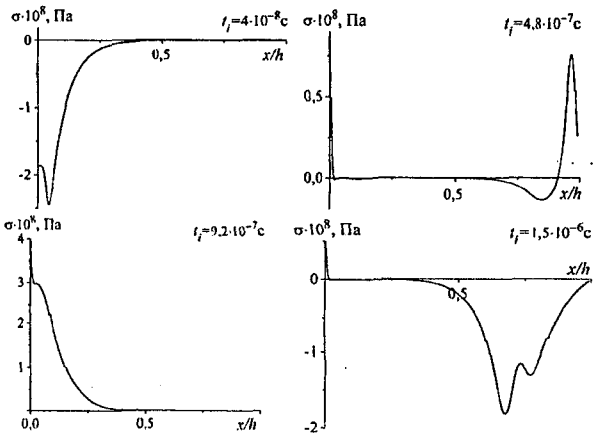


Рис.8. Динамика распределения волн напряжения по длине кристалла при $W = 15$ Дж/см².

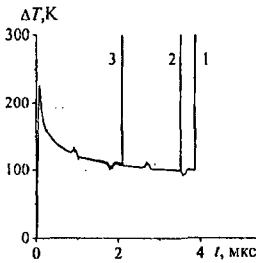


Рис.9. Зависимость температуры на границе раздела подложка – ВВ от времени при воздействии лазерного импульса с плотностью энергии $W = 17,5$ Дж/см² и $\Delta V^* = 0$ (1), $4 \cdot 10^{-10}$ (2), $-4 \cdot 10^{-10}$ эВ/Па (3).

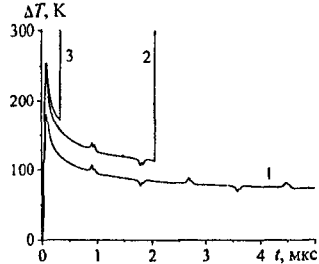


Рис.10. Зависимость температуры на границе раздела подложка – ВВ от времени при воздействии лазерного импульса с плотностью энергии $W = 15$ (1), 18 (2), 19 (3) Дж/см² и $\Delta V^* = 0$.

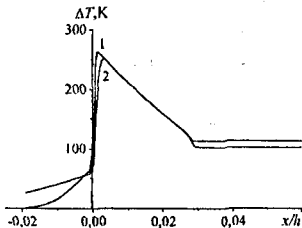


Рис.11. Распределение температуры на границе ВВ – подложка при воздействии лазерного импульса с $W = 15$ Дж/см²: $t = 5,15 \cdot 10^{-7}$ (1), $5 \cdot 10^{-6}$ с (2).

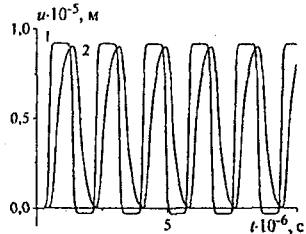


Рис.12. Влияние длительности лазерного импульса на форму акустического сигнала: $\tau_i = 40$ (1), 400 нс (2) ($W = 15$ Дж/см², $\Delta V^* = 0$).

Согласно рис.11, основной теплоотвод из ВВ происходит в подложку. Это приводит с одной стороны к повышению порога инициирования, а с другой стороны к уменьшению времени задержки инициирования.

На рис.12 приведены результаты расчета смещения задней стенки (акустический сигнал) ВВ при плотности энергии лазерного импульса $W = 15$ Дж/см² и различных длительностях лазерного импульса. Как видно рис.12, чем больше длительность импульса, тем сильнее акустический сигнал смещается вправо.

В четвертой главе проведено численное моделирование инициирования ТЭНа электронным импульсом. Решалась система уравнений связанной термоупругости с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho \left[c + H_f \delta(T - T_f) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 3\alpha_s K T_0 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\Lambda(x)}{R_e} I(t) + q K_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right),$$

$$c_s^2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = 3\alpha_s K \frac{\partial^2 T}{\partial t^2},$$

где h – толщина образца; R_e – эффективная длина линейного пробега электрона; $\Lambda(x)$ – распределение плотности поглощенной энергии электронного пучка.

На рис.13 представлены результаты расчета температуры в области поглощения электронного пучка. На рис.14 приведены результаты расчета зависимости температуры в области максимума поглощения электронного пучка от времени при различных плотностях энергии и $\Delta V^* = 0$. Появление «ступенек» на кривых распределения температуры обусловлено плавлением кристалла.

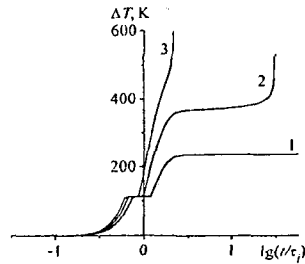
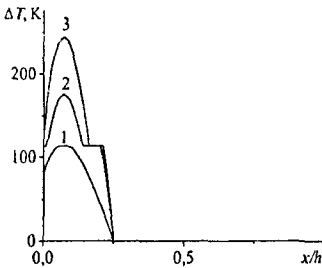


Рис.13. Распределение температуры в образце в различные моменты времени при поглощении электронного пучка: $t = 1 \cdot 10^{-8}$ (1), $1,7 \cdot 10^{-8}$ (2), $2 \cdot 10^{-8}$ с (3) ($W = 20$ Дж/см², $h = 1$ мм).

Рис.14. Влияние плотности поглощенной энергии на зависимость изменения температуры от времени в максимуме поглощения электронного пучка в ТЭНе при $W = 15$ (1), 20 (2), 25 Дж/см² (3) ($\Delta V^* = 0$, $h = 1$ мм).

На рис.15 представлены результаты расчета изменения температуры ТЭНа в области максимума поглощения электронного пучка с плотностью энергии $W = 20$ Дж/см² при различных значениях активационного объема. Как видно

из рис.15, упругие напряжения довольно эффективно влияют на энергию активации экзотермической реакции и соответственно на скорость реакции.

На рис.16 представлены результаты расчета времени задержки инициирования ТЭНа электронным импульсом в зависимости от ΔV^* при различных толщинах кристалла. Из рис.16 видно, что кривые $t^* = f(\Delta V^*)$ имеют максимум вблизи $\Delta V^* = 0$, слабо зависящий от толщины кристалла. Время задержки инициирования ТЭНа с увеличением ΔV^* по модулю, уменьшается при толщинах $h = 0.5$ и 1.0 мм. При $h = 1.5$ мм время задержки инициирования перестает зависеть от ΔV^* (кривая 3).

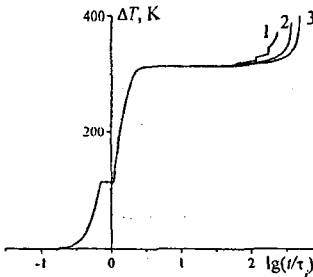


Рис.15. Влияние активационного объема на зависимость изменения температуры от времени в максимуме поглощения электронного пучка в ТЭНе при $\Delta V^* = 3 \cdot 10^{-10}$ (1), $\Delta V^* = -3 \cdot 10^{-10}$ (2) и $\Delta V^* = 0$ (3) и $h = 1$ мм.

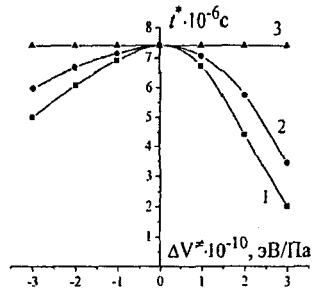


Рис.16. Влияние объема активации ΔV^* на время задержки инициирования ТЭНа электронным импульсом при $W = 18$ Дж/см², $\tau_i = 15$ нс: $h = 0.5$ (1), 1.0 (2) и 1.5 мм (3).

На рис.17 представлена динамика распределения термоупругих напряжений по кристаллу при $W = 10$ Дж/см² $< W^*$. Из рис.17 видно, что вначале возникают напряжения сжатия, переходящие потом в напряжения растяжения. Кроме того, расчеты показали, что чем больше длительность импульса, тем меньше амплитуда термоупругих напряжений (рис.18), возникающих в конденсированном веществе и тем меньше влияние их на время задержки инициирования.

Длительность импульса электронного пучка влияет также и на форму акустического сигнала (рис.19). Видно, что чем больше длительность электронного пучка, тем больше происходит «расплывание» акустического сигнала и меньше его амплитуда. «Расплывание» акустического сигнала обусловлено диффузией тепла из зоны поглощения. Период колебаний близок к экспериментальному, который составляет порядка 700 нс [1].

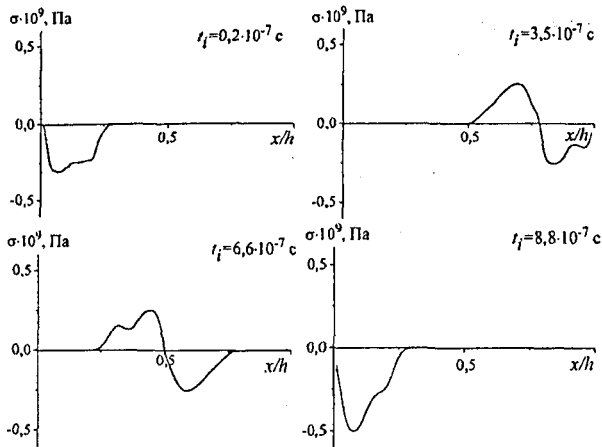


Рис.17. Динамика распределения нормальных термоупругих волн напряжения по толщине кристалла.

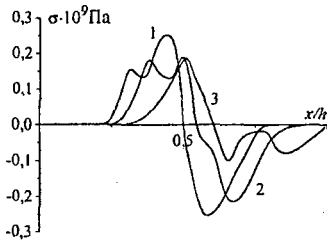


Рис.18. Распределение термоупругих напряжений по образцу в момент времени $t = 0,66$ мкс при $\tau_i = 15$ (1), 40 (2), 100 нс (3), ($W = 20$ Дж/см², $\Delta V^* = 0$).

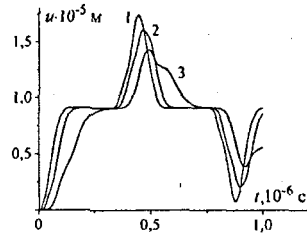


Рис.19. Влияние длительности электронного импульса на форму акустического сигнала: $\tau_i = 15$ (1), 40 (2), 100 нс (3), ($W = 20$ Дж/см², $\Delta V^* = 0$).

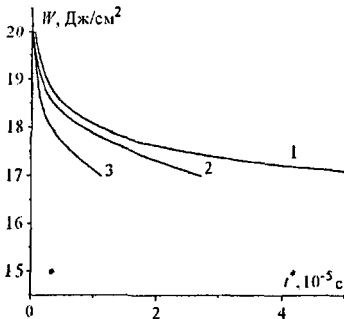


Рис.20. Зависимость времени задержки зажигания от плотности потока энергии при $\Delta V^* = 0$ (1), $-4 \cdot 10^{-10}$ (2), $4 \cdot 10^{-10}$ эВ/Па (3), точка эксперимент [1].

Расчеты показали, что критическая плотность энергии электронного пучка $W^* = 14,9$ Дж/см², т.е. близка к эксперименту. Однако время задержки в этом

случае очень велико и составляет примерно $t^* \approx 4.27 \cdot 10^{-3}$ с. Время задержки сопоставимо с экспериментальным $t^* \approx 3.45 \cdot 10^{-6}$ с при $W^* = 18.1$ Дж/см² и $\Delta V^* = 4 \cdot 10^{-10}$ эВ/Па (рис.20).

Основные результаты и выводы

1. Получен критерий зажигания конденсированных взрывчатых веществ коротким лазерным импульсом гауссовой формы по сечению пучка, позволяющий учитывать зависимость коэффициента поглощения от температуры, плавления, радиус светового пучка.
2. Пороговая энергия иницирования ТЭНа с открытой поверхностью лазерным импульсом удовлетворительно объясняется экзотермической реакцией нулевого порядка.
3. Подложка сложным образом влияет на иницирование ВВ: во-первых, свободная граница находится не на поверхности ВВ, а на внешней поверхности подложки. В этом случае волны термоупругих напряжений, проходя через границу раздела подложка – ВВ, влияют на энергию активации экзотермической реакции и как следствие на ее скорость. Во-вторых, теплообмен ВВ с подложкой уменьшает время задержки зажигания лазерным импульсом и увеличивает критическую плотность энергии.
4. Энергетический порог иницирования ТЭНа электронным импульсом удовлетворительно согласуется с экспериментом и определяется тепловой моделью с реакцией нулевого порядка.
5. Предсказан размерный эффект – зависимость времени задержки иницирования ТЭНа электронным импульсом от толщины образца. Данный эффект связан с тем, что при поглощении энергии электронного пучка возникают термоупругие напряжения, которые перемещаются по образцу в виде волн и влияют на энергию активации экзотермической реакции.
6. Расчеты показали, что чем больше длительность лазерного или электронного импульсов, тем меньше амплитуда термоупругих напряжений, возникающих в конденсированном веществе, и тем меньше влияние их на время задержки и порог иницирования.

Список цитируемой литературы

1. Адуев, Б.П. Исследование ранних стадий взрывного разложения кристаллов тентранитропентаэритрита при иницировании импульсными электронными пучками / Б.П. Адуев, Г.М. Белокуров, С.С. Гречин, В.Н. Швайко // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. – №2. – С.3-9.
2. Олешко, В.И. О природе свечения, возникающего при облучении тентранитропентаэритрита электронным пучком / В.И. Олешко, В.И. Корепанов, В.М.Лисицын, В.П. Ципилев // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – №5. – С.87-89.
3. Быхало, А.И. Иницирование ТЭНа мощным лазерным излучением / А.И. Быхало, Е.В. Жужукало, Н.Г. Ковальский, А.Н. Коломийский, В.В. Коробов, А.Д. Рожков, А.И. Юдин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – №4. – С.110-113.

Список публикаций по теме диссертации

1. Дугинов, Е.В. Влияние термоупругих напряжений на экзотермическую реакцию при инициировании ТЭНа электронным импульсом / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Ползуновский вестник. – 2008. – №3. – С.42-46.
2. Дугинов, Е.В. Динамика термоупругих напряжений при инициировании ТЭНа электронным и лазерным импульсами / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т.51. – №11/3. – С.107-116.
3. Дугинов, Е.В. Влияние подложки на экзотермическую реакцию при инициировании ТЭНа лазерным импульсом с учетом термоупругих напряжений / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С.67-71.
4. Дугинов, Е.В. Влияние термоупругих напряжений на экзотермическую реакцию при инициировании PETN электронным импульсом / Е.В. Дугинов, Г.А. Иванов, А.В. Ханефт // Известия вузов. Физика. – 2009. – № 8/2. – С.30-33.
5. Дугинов, Е.В. Влияние термоупругих напряжений на инициирование ТЭНа наносекундным электронным импульсам / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2008. – №2. – С.79-83.
6. Khanef, A.V. Numerical modeling of PETN initiation by electron and laser pulse / A.V. Khanef, E.V. Duginov // Eurasian Physical Technical Journal. –Karaganda, Republic of Kazakhstan. – 2008. – Vol. 5, – No 2 (10). – P. 31-40.
7. Khanef, A.V. The effect of the light beam radius of a laser pulse on the critical energy of explosive ignition / A.V. Khanef, E.V. Duginov // Energetic Materials – Characterisation and Performance of Advanced Systems. 38th International Annual Conference of ICT, – 2007. –Karlsruhe, Federal Republic of Germany. – P.117-1–117-11.
8. Khanef, A.V. Dynamics of thermoelastic stresses at initiation of the PETN by electron pulse / A.V. Khanef, E.V. Duginov // Energetic Materials: 39th International Annual Conference of ICT. –Karlsruhe, Federal Republic of Germany. – 2008. – P.94-1–94-12.
9. Khanef, A.V. The modeling of initiation by PETN laser pulse / A.V. Khanef, E.V. Duginov // Energetic Materials: 40th International Annual Conference of ICT. – Karlsruhe Federal Republic of Germany. – 2009. – P.48-1–48-7.
10. Khanef, A.V. Modeling of PETN initiation by an electron pulse with nanosecond duration / A.V. Khanef, E.V. Duginov // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Russia. – 2008. – P.391-394.
11. Дугинов, Е.В. Влияние параметров лазерного импульса на инициирование ТЭНА / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Ползуновский альманах. – 2007. – №1-2. – С.52-56.
12. Khanef, A.V. Dynamics of thermoelastic stresses at initiation of the PETN by laser pulse / A.V. Khanef, E.V. Duginov // ISEM2008 – The 3rd International symposium on Energetic Materials and their Applications. – 2008. – Tokyo, Japan. – P.51.
13. Ханефт, А.В. Влияние радиуса светового пучка лазерного импульса на критическую энергию зажигания взрывчатого вещества / А.В. Ханефт, Е.В. Дугинов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. – Томск. – 2006. – С.171-172.
14. Дугинов, Е.В. Моделирование инициирования ТЭНа лазерным импульсом / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Доклады десятой международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах» – Кемерово. – 2007. – Т. 1. –С. 219-222.
15. Дугинов, Е.В. Динамика термоупругих напряжений при инициировании ТЭНа лазерным импульсом. / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Доклады десятой международ-

- ной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах (ФХП-10)». – Кемерово. – 2007. – Т.1. – С. 222-226.
16. Ханефт, А.В. Численное моделирование инициирования ТЭНа электронным и лазерным импульсами / А.В. Ханефт, Е.В. Дугинов // Хаос и структуры в нелинейных системах, теория и эксперимент. – 2008. – Астана, Казахстан. – С.206-213.
17. Дугинов, Е.В. Численное моделирование инициирования ТЭНа лазерным импульсом / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы VI всероссийской научной конференции, посвященной 130-летию Томского государственного университета и 40-летию НИИ прикладной математики и механики томского государственного университета. Томск. – 2008. – С.109-110.
18. Дугинов, Е.В. Вывод критерия зажигания конденсированного взрывчатого вещества лазерным импульсом с учетом зависимости коэффициента поглощения от температуры / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Материалы конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск, Россия. – 2008. – С.792-797.
19. Ханефт, А.В. Моделирование инициирования тэна пучком электронов наносекундной длительности / А.В. Ханефт, Е.В. Дугинов // XIV симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докладов. – Черноголовка. – 2008. – С.306.
20. Дугинов, Е.В. Динамика термоупругих напряжений при инициировании ТЭНа электронным и лазерным импульсами / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск, Россия. – 2008. – С.928-940.
21. Дугинов, Е.В. Численное моделирование инициирования ТЭНа наносекундным электронным импульсом / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы VI всероссийской научной конференции, посвященной 130-летию Томского государственного университета и 40-летию НИИ прикладной математики и механики томского государственного университета. – Томск. – 2008. – С.111-112.
22. Ханефт, А.В. Модель влияния подложки на инициирование PETN лазерным импульсом / А.В. Ханефт, Е.В. Дугинов // Современные проблемы химической и радиационной физики. Сборник кратких статей. – Москва, Черноголовка. – 2009, – С. 352-356.
23. Дугинов, Е.В. Влияние зависимости коэффициента поглощения от температуры на условие зажигания конденсированного взрывчатого вещества лазерным импульсом / Е.В. Дугинов, А.В. Ханефт // Современные проблемы химической и радиационной физики. Сборник кратких статей. – Москва, Черноголовка. – 2009, – С.357-359.

Подписано в печать 08.09.2010

Формат 60*84^{1/16}.

Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,25

Тираж 100 экз. Заказ № 000411

Отпечатано в типографии ООО «Фирма Полиграф»

650000. Г. Кемерово, ул. 50 лет Октября, 11-614

Тел. (384-2) 34-95-65