На правах рукописи

ИСМАТОВ ТОЛИБ НАБИДЖОНОВИЧ

ТЕРМОУПРУГАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МЕТАЛЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ БЫСТРЫХ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПИКА

АТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Душанбе – 2026

Работа выполнена в отделе физики конденсированных сред им. профессора Б.Н. Нарзуллаева НИИ Таджикского национального университета.

Научный руководитель: **Салихов Тагаймурод Хаитович** – член-корр. НАНТ, доктор физ.-мат. наук, профессор, ГНС НИИ Таджикского национального университета

Официальные оппоненты: **Ивлиев Андрей Дмитриевич –** доктор физико-математических наук, профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин ФГАОУ ВО «Уральский государственный педагогический университет»

Кабилов Маруф Махмудович – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом прикладной математики и механики Института математики им. А. Джураева Национальной академии наук Таджикистана.

Ведущая организация: Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан.

Защита состоится 12 января 2027 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 99.0.057.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе**,** пр. Рудаки, 17

Отзывы направлять по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, ТНУ, диссертационный совет 99.0.057.02, E-mail: tgnu@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Таджикского национального университета (www.tnu.tj)

Автореферат разослан «_____»_____ 2026 г.

Ученый секретарь объединённого диссертационного совета **Акдодов Д.М.**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Стремительное развитие ускорительной техники и технологий, связанных с использованием пучков быстрых тяжелых ионов (БТИ), открывает широкие перспективы для модификации материалов, создания новых функциональных структур и устройств, а также для фундаментальных исследований в области физики твердого тела. Взаимодействие тяжелых ионов с металлами сопровождается разнообразными физическими процессами, среди которых особое место занимают термоупругие эффекты, обусловленные локальным и интенсивным выделением энергии в зоне проникновения ионов [1-7].

Исследование термоупругих эффектов при взаимодействии тяжелых ионов с металлами имеет важное значение для понимания механизмов радиационного повреждения, формирования дефектов и треков, а также для прогнозирования поведения материалов в условиях интенсивного облучения. Эти знания необходимы для разработки радиационно-стойких материалов для ядерной энергетики и космической техники, а также для создания новых методов ионной имплантации и модификации поверхности [8-14].

Процессы теплопереноса играют ключевую роль в формировании термоупругого отклика металлов на импульсное воздействие БТИ. Быстрый нагрев вещества в зоне трека иона приводит к возникновению высоких температурных градиентов и интенсивному теплопереносу, что существенно влияет на распределение температуры, термоупругие напряжения (ТУН) и в конечном итоге, на структурные изменения в материале. Несмотря на значительный интерес к данной проблеме и наличие достаточные количества теоретических и экспериментальных работ, комплексное исследование термоупругих эффектов при взаимодействии БТИ с металлами с учетом динамики теплопереноса остается актуальной задачей.

Степень изученности проблемы, теоретическая и методологическая основа исследования. Теоретическое описание термоупругих эффектов, возникающих при взаимодействии тяжелых ионов с металлами, базируется на совместном решении уравнений теории упругости и уравнений, описывающих процессы переноса энергии и импульса в облучаемом материале. Исследования И.М. Лифшица, М.И. Каганова и Л.В. Танатарова, заложили основы для понимания радиационных изменений в металлах [1]. Дальнейшие исследования были посвящены моделированию теплофизических процессов при воздействии мощных импульсных пучков заряженных частиц [2-7]. Были разработаны модели, описывающие возбуждение упругих волн в твердом теле под действием ионного пучка, а также проведено численное исследование особенностей температурных полей (ТП) и ТУН, возникающих при облучении тяжелыми ионами [8-14].

В современных исследованиях обобщенная трехмерная модель термического пика (МТП) адаптируется для анализа взаимодействия тяжелых ионов с тонкими мишенями и наночастицами путем усложнения теплофизического аппарата за счет учета температурной зависимости теплофизических параметров, интеграции нелинейных механизмов электрон-

фононного взаимодействия, кинетики радиационных дефектов и структурно-фазовых превращений [2, 5-7]. Из-за высокой сложности и нелинейных эффектов эти механизмы крайне трудно описать аналитически, что привело к доминированию численных методов. В результате большинство современных работ в этой области носит вычислительный характер [14-16].

Однако, несмотря на успехи компьютерного моделирования, многие фундаментальные вопросы остаются открытыми. В частности, недостаточно изучено влияние теплопереноса на термоупругие эффекты и генерацию АВ в условиях экстремальных температур [17-19]. В отличие от большинства существующих работ, ориентированных на сложные численные расчеты, в данном исследовании предлагается аналитический подход. С помощью обоснованных физических упрощений становится возможным получить четкие математические зависимости, описывающие распределение температуры и ТУН. Такой метод обеспечивает прозрачность физической интерпретации процессов и позволяет глубже изучить, как микроструктура металлов влияет на их радиационную стойкость [19,20].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цели исследования работы является построение теоретической модели, адекватно описывающей термоупругие эффекты, возникающие при взаимодействии тяжелых ионов с металлами. Особое внимание будет уделено роли теплопереноса в формировании термоупругого отклика материала, а также влиянию микроструктуры металла на протекание этих процессов.

Задачи исследования:

– обосновании математической модели, описывающей особенности термоупругих эффектов, учитывающую особенности взаимодействия тяжелых ионов с металлами;

– исследование влияния динамики теплопереноса на распределение ТП и ТУН в зоне локального нагрева с учетом ключевых механизмов релаксации энергии в рамках двухтемпературного приближения, включая электронную теплопроводность, теплопроводность кристаллической решетки и межподсистемный энергообмен;

– проведение численного расчета полученных выражений ТП и ТУН с учетом нестационарной динамики теплопереноса, геометрических параметров мишени и пространственно-временного распределения энергии пучка;

– сравнение результатов, полученных в рамках предложенной математической модели с доступными экспериментальными данными по облучения металлов.

Объект исследования является металлические образцы, подвергающиеся импульсному облучению пучками быстрых тяжелых ионов.

Предмет исследования являются теплофизические процессы обмена энергией между электронной и фононной подсистемами и механизмы генерации термоупругих акустических волн.

Теоретические основы исследования включает в себя методы кинетического уравнения, численных расчетов с применением современных компьютерных программных средств, а также другие подходы, позволяющие моделировать и анализировать динамические и акустические свойства жидкостей. Перечисленные методы позволяют корректно вычислять любые задаваемые параметры и детально исследовать их зависимости от различных

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

– проведен аналитический исследование ТУН, возникающих при взаимодействии пучков БТИ с металлами в рамках МТП;

– предложена аналитическая модель, позволяющая оценить термоупругий отклик металлов на импульсное воздействие БТИ, учитывая эффекты ангармонизма решетки и электрон-фононного взаимодействия;

– представлена упрощённый модель формирования ТУН в металлах при воздействии БТИ, учитывающая динамику развития термического пика и его влияние на ТУН;

– корректно описан наблюдаемые в экспериментах параметры упругих волн, генерируемых при воздействии тяжелых ионов с металлами;

– сформулирована теоретическая модель термоупругого отклика на импульсное воздействие тяжелых ионов и показан возможность генерации высокочастотных упругих волн и формирования локальных зон пластической деформации в металлах, что было подтверждено экспериментально.

Положения, вносимые на защиту:

– решения для пространственно-временного распределения температур электронной и ионной подсистем металла при воздействии импульсных пучков БТИ, полученные в рамках МТП с учетом реальных (гауссовых, экспоненциальных и ступенчатых) профилей пучка;

– разработанная теоретическая модель и аналитические выражения, описывающие динамику формирования ТУН и генерацию АВ в полубесконечных металлических мишенях и пластинах с учетом эффектов пространственного затухания энергии по глубине;

– результаты численного расчеты термоупругого отклика и установленные закономерности, доказывающие определяющую роль кинетики электрон-фононного взаимодействия и параметров ионного импульса в формировании амплитудно-временных характеристик генерируемых высокочастотных акустических сигналов.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в:

– полученные результаты позволяют оценить влияние ангармонизма решетки и электрон-фононного взаимодействия на формирование ТУН и генерацию упругих волн в металлах;

– развитое теория термоупругости для описания динамики термического пика и его влияния на ТУН в металлах при воздействии БТИ позволяет более точно предсказывать параметры упругих волн, генерируемых при ионной имплантации, а также прогнозирования

радиационной стойкости материалов и развития современных методов неразрушающей акустической диагностики;

– полученные результаты позволяют оценить и определить численные значения термоупругих напряжений и параметров генерируемых акустических сигналов в металлах при воздействии импульсных пучков быстрых тяжёлых ионов с различными пространственно-временными профилями;

– результаты проведённых вычислений дополняют существующие представления о динамике тепловых полей и акустическом отклике металлических мишеней в условиях сверхбыстрого радиационного нагрева. Это даёт возможность учитывать особенности поведения конструкционных материалов при экстремальных режимах облучения, выявлять связь акустических характеристик с параметрами электрон-фононного взаимодействия и оптимизировать условия проведения ионно-лучевой обработки и модификации поверхности;

Достоверность полученных результатов:

– обеспечиваются строгой физико-математической постановкой рассматриваемых задач, базирующейся на фундаментальных законах механики сплошных сред, термодинамики неравновесных процессов и макроскопической кинетики;

– предложенный теоретические модели опираются на апробированный математический аппарат дифференциальных уравнений в частных производных, интегральных преобразований, а также на надежно зарекомендовавшие себя физические концепции двухтемпературного приближения и динамической теории термоупругости;

– корректность полученных точных аналитических решений подтверждается их правильным асимптотическим поведением, строгими предельными переходами к известным классическим частным случаям, а также внутренним математическим контролем при проведении численных расчетов.

– физическая адекватность и надежность предложенных моделей дополнительно подтверждаются удовлетворительным качественным и количественным согласием результатов теоретического моделирования профилей ТП и амплитудно-временных характеристик АВ с доступными данными независимых экспериментальных исследований воздействия высокоэнергетических ионных пучков на металлические мишени.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует Паспорту номенклатуры специальностей ВАК при Президенте Республики Таджикистан по специальности 1.3.8 – Физика конденсированных сред по следующим пунктам:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных органических и неорганических систем, в том числе классических и квантовых жидкостей, стекол различной природы и дисперсионных систем.

2. Разработка математических моделей и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных сред в зависимости от влияния внешних факторов.

Личный вклад соискателя состоит в анализе научной литературы по выбранной теме, обоснование математических моделей сформированных задач и получение решение этих уравнения, а также проведение численных расчетов по формированию ТП и акустического сигнала в различных металлических образцах. Все результаты, приведенные в диссертации получены самим автором. Результаты работы были опубликованы при его непосредственном участии в виде статей и материалов конференций.

Этапы исследования включают в себя обоснованный выбор темы диссертации на основе обзора литературы и анализа современного состояния проблемы, постановка целей и задач исследования, выбор методов получение решение полученных систем дифференциальных уравнения, а также их анализ и обсуждение.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих международных и республиканских конференции: VI-ой межд. конф. «Современные проблемы физики» (Душанбе, 2018); респуб. научно-теорет. конф. ППС и сотрудников ТНУ; IV-ой международной научной конференции: «Вопросы физической и координационной химий» (Душанбе, 2019); Респуб. НПК ППС и сотрудников ТНУ (Душанбе, 2020; 2022; 2025); Респуб. НПК «Современные проблемы теории дифференциальных уравнений» (Душанбе, МУТП, 2020); II-ой межд. НПК на тему «О применении дифференциальных уравнений при решении прикладных задач» (Душанбе, 2021); респуб. НПК “Развитие и достижения физической науки в годы независимости”, (Душанбе, 2023); межд. НПК на тему «Развитие новых направлений в химии и химической технологии» (Душанбе, 2023); респуб. НПК ПСС НИИ ТНУ (Душанбе,2025).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 17 статей, 7 из которых в рецензируемых журналах из Перечня ВАК РФ, 10 тезисов докладов в материалах международных и республиканских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Содержание работы изложено на 141 страницах, включая 2-таблицы, 32 рисунков и список литературы из 141 наименований.

Ключевые слова: металл, ион, импульсный пучок ионов, быстрый тяжёлый ион, температурное поле, модель термического пика, термоупругость, акустика, акустическая волна.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, дана оценка степени изученности проблемы выбраны объект и предмет исследования, выделены научная новизна, выносимые на защиту положения, теоретическая и практическая значимость исследования.

В первой главе представлен обзор экспериментальных исследований, теоретических подходов и численных методов, применяемых при изучении

взаимодействия быстрых тяжёлых ионов с металлами и механизмов термоупругой генерации акустических волн. Рассмотрены основные особенности диссипации энергии тяжёлых ионов в конденсированных средах, включая анализ электронных и ядерных потерь, а также детально описана МТП и двухтемпературное приближение для описания сверхбыстрой тепловой релаксации в металлах. Показано, что существующие теоретические и численные методы исследования в недостаточной степени учитывают влияние пространственно-временных характеристик ионного пучка и кинетики электрон-фононного взаимодействия на формирование термоупругих напряжений и параметры генерируемых акустических импульсов, что определяет необходимость дальнейшего развития аналитических моделей в данной области.

Вторая глава состоит из пяти разделов и посвящена исследованию теплофизических аспектов формирования температурных полей в металлах при воздействии импульсных пучков быстрых тяжёлых ионов с различными пространственно-временными профилями. В рамках двухтемпературной МТП с использованием интегральных преобразований Лапласа по времени и Ханкеля по радиальной координате найдены точны аналитические решения системы уравнений теплопроводности для электронной и ионной подсистем металла. Рассмотрены различные конфигурации функции источника энергии: со ступенчатым, экспоненциальным и гауссовым временным профилем, а также с экспоненциальным и гауссовым радиальным распределением поглощённой дозы. Особое внимание уделено учёту затухания электронных потерь энергии по глубине мишени в рамках аппроксимации Лямшева. На основе полученных аналитических выражений выполнен численный расчёт пространственно-временных распределений температур электронного газа и кристаллической решётки для меди, золота и никеля.

В разделе 2.1 сформулирована система линейных дифференциальных уравнений теплопроводности, описывающая трехмерную МТП для исследования формирования ТП металлов при воздействии импульсного ионного пучка быстрых тяжёлых ионов со ступенчатым временным профилем.

МТП в цилиндрической системе координат имеет вид[1-3]:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \kappa_e \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) - g(T_e - T_i) + A_e(r,t) \qquad (1)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \kappa_i \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) - g(T_e - T_i) \qquad (2)$$

где C_e, C_i, k_e и k_i – удельной теплоемкости и теплопроводности электронного газа и решетки, соответственно, g – коэффициент, характеризующий передачу энергии от электронного газа решетке, а $A_e(r,t) = bS_e f(t) D(r)$, S_e – профиль ионизационных потерь иона, $f(t) = \theta(t) - \theta(t - t_0)$ - ступенчатая функция Хэвисайда, а $D(r) = exp(-r/r_0)$, где t_0 – длительность воздействия источника (импульса), r_0 – пространственная ширина высоковозбужденных области ($r_0 \leq 2.5$ *нм* [2] и $r_0 \approx 1$ *нм* [8]), b – нормировочная константа,

определяемая из условия нормировки [2,3]: $\int_{t=0}^{\infty}\int_{r=0}^{\infty} 2\pi A_e(r,t) r dr dt = S_e$. Отсюда находим, что $b = \frac{1}{2\pi t_0 r_0^2}$.

Для совместного решения системы уравнений (1)-(2) используются соответствующие начальные и граничные условия 14-16]:

$$T'_{e,i}(r,z,0) = 0, \quad \left.\frac{\partial T'_{e,i}(r,z,t)}{\partial r}\right|_{r=0} = 0, \quad \kappa_{e,i}\left.\frac{\partial T'_{e,i}(r,z,t)}{\partial z}\right|_{z=0,L} = 0. \qquad (4)$$

Решение задачи, полученное с использованием интегральных преобразований, имеет следующий вид:

$$T'_i(r,t) = \frac{bS_e g r_0^2}{C_e C_i}\int_0^{\infty} \frac{J_0(rs)}{(1+r_0^2 s^2)^{3/2}}[\Phi_i(t)u(t) - \Phi_i(t-t_0)u(t-t_0)]sds \qquad (5)$$

$$T'_e(r,t) = \frac{bS_e r_0^2}{C_e C_i}\int_0^{\infty} \frac{J_0(rs)}{(1+r_0^2 s^2)^{3/2}}[\Phi_e(t)u(t) - \Phi_e(t-t_0)u(t-t_0)]\,sds, \qquad 6)$$

где $J_0(x)$- функция Бесселя, $\Phi_i(t) = \frac{1}{p_1 p_2} + \frac{e^{p_1 t}}{p_1(p_1-p_2)} + \frac{e^{p_2 t}}{p_2(p_2-p_1)}$,

$$\Phi_e(t) = \frac{\kappa_i s^2 + g}{p_1 p_2} + \frac{C_i p_1 + \kappa_i s^2 + g}{p_1(p_1-p_2)} e^{p_1 t} + \frac{C_i p_2 + \kappa_i s^2 + g}{p_2(p_2-p_1)} e^{p_2 t},$$

$$p_{1,2}(s) = \frac{C_i B_e - C_e B_i}{2C_e C_i} \pm \frac{\sqrt{[C_e B_i + C_i B_e]^2 - 4C_e C_i[B_e B_i - g^2]}}{2C_e C_i}, \quad B_{e,i} = \kappa_{e,i} s^2 + g.$$

Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 2.4.

В разделе 2.2 предложена математическая модель для исследования формирования температурного поля в металлических пластинках под действием ионного пучка с экспоненциальным временным и гауссовым радиальным затуханием.

Математическая постановка задачи базируется на трёхмерное системе дифференциальных уравнений МТП:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \kappa_e\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_e}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2}\right) - g(T_e - T_i) + A_e(r,t) \qquad (7)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) \qquad (8)$$

Функция объемной плотности мощности источника $A_e(r,t)$ в данном случае задается в следующем виде [17-19]: $A_e(r,t) = bS_e e^{-\alpha t} e^{-r^2/r_0^2}$, где $\alpha = 1/t_0$.

Для совместного решения системы уравнений (7)-(8) используются соответствующие начальные и граничные условия (4). Решение задачи (7)-(8), полученное с использованием интегральных преобразований, имеет следующий вид:

$$T'_e(r,t) = \frac{bS_e r_0^2}{2C_e}\int_0^{\infty} \frac{e^{-r_0^2 s^2/4} J_0(rs)}{p_1 - p_2} \times \\ \times \left[\left(p_1 + \frac{g}{C_i}\right)\frac{e^{p_1 t} - e^{-\alpha t}}{p_1 + \alpha} - \left(p_2 + \frac{g}{C_i}\right)\frac{e^{p_2 t} - e^{-\alpha t}}{p_2 + \alpha}\right] sds, \qquad (9)$$

$$T'_i(r,t) = \frac{bS_e g r_0^2}{2C_e C_i}\int_0^{\infty} e^{-\frac{s^2 r_0^2}{4}} \frac{J_0(rs)}{p_1 - p_2}\left[\frac{e^{p_1 t} - e^{-\alpha t}}{p_1 + \alpha} - \frac{e^{p_2 t} - e^{-\alpha t}}{p_2 + \alpha}\right] sds, \qquad (10)$$

где

$$p_{1,2} = \frac{-\left(\kappa_e s^2 + g + \frac{gC_e}{C_i}\right) \pm \sqrt{\left(\kappa_e s^2 + g + \frac{gC_e}{C_i}\right)^2 - 4C_e\left(\frac{g\kappa_e s^2}{C_i}\right)}}{2C_e}.$$

Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 2.4.

В разделе 2.3 предложена математическая модель для исследования формирования температурных полей в металлических пластинках под действием ионного пучка с гауссовым временным и экспоненциальным радиальным распределением энергии.

Математическая постановка задачи базируется на системе уравнений МТП (7)-(8), аналогичной рассмотренной в разделе 2.2, но с модифицированной функцией источника [5, 6, 19] $A_e(r,t) = bS_e f(t)D(r)$, где $f(t) = \exp[-(t-t_0)^2/(2t_0^2)]$, $D(r) = \exp(-r/r_0)$.

Решение задачи (7)-(8), полученное с использованием интегральных преобразований с учетом начальных и граничных условий (4), имеет следующий вид:

$$T_e'(r,t) = \frac{bS_e r_0^2}{C_e}\int_0^\infty \frac{J_0(rs)}{(1+r_0^2 s^2)^{3/2}} \times \times \left[\int_0^t f(\tau)\frac{(p_1 + g/C_i)e^{p_1(t-\tau)} - (p_2 + g/C_i)e^{p_2(t-\tau)}}{p_1 - p_2}d\tau\right] sds, \quad (11)$$

$$T_i'(r,t) = \frac{bS_e g}{2C_e C_i}\int_0^\infty \frac{J_0(rs)}{(1+r_0^2 s^2)^{3/2}} \times \left[\int_0^t f(\tau)\frac{e^{p_1(t-\tau)} - e^{p_2(t-\tau)}}{p_1 - p_2}d\tau\right] sds. \quad (12)$$

Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 2.4.

В разделе 2.4 предложена математическая модель для исследования формирования температурных полей в металлических мишенях с учётом затухания электронных потерь энергии по глубине в рамках аппроксимации Лямшева.

Математическая постановка задачи базируется на МТП (7)–(8) с функцией источника $A_e(r,t) = bS_e f(t)D(r)\,\mu(z) = exp(-\mu_0 z)$, где $f(t) = e^{-\alpha t}$, $\alpha = 1/t_0$, $D(r) = e^{-r^2/r_0^2}$, $\mu(z) = exp(-\mu_0 z)$. В данном разделе принято следующее упрощение [14-16]: в начальные моменты нагрева, до достижения термического равновесия с решеткой, разность температур велика. Это позволяет использовать допущение $T_e - T_i \approx T_e$ для упрощения уравнения (6).

Начальные и граничные условия [217-19] в следующем виде:

$$T_{e,i}'(r,z,0) = 0, \quad \left.\frac{\partial T_{e,i}'(r,z,t)}{\partial r}\right|_{r=0} = 0, \quad \kappa_{e,i}\left.\frac{\partial T_{e,i}'(r,z,t)}{\partial z}\right|_{z=0} = 0. \quad (13)$$

Решение задачи (7)-(8), полученное с применением метод вариации произвольных постоянных имеет следующий вид:

$$T_e'(r,z,t) = \int_0^\infty \frac{bS_e\overline{D}(s)J_0(sr)}{C_e(p_0 - p_1)} \times \left[e^{-\mu_0 z}(e^{p_0 t} - e^{p_1 t}) - \sqrt{\chi_e}\mu_0\big(\Omega(p_0) - \Omega(p_1)\big)\right] sds \quad (14)$$

$$T_i(r,z,t) = \int_0^\infty \frac{gbS_e\bar{D}(s)}{C_iC_e}\left\{e^{-\mu_0 z}\left[\frac{e^{p_3 t}}{(p_3-p_0)(p_3-p_1)} + \frac{e^{p_0 t}}{(p_0-p_3)(p_0-p_1)} + \frac{e^{p_1 t}}{(p_1-p_3)(p_1-p_0)}\right] - \right.$$
$$\left. -\mu_0\sqrt{\chi_e}\left[\frac{\Omega(p_0)}{(p_0-p_1)(p_0-p_3)} + \frac{\Omega(p_1)}{(p_1-p_0)(p_1-p_3)} + \frac{\Omega(p_3)}{(p_3-p_0)(p_3-p_1)}\right]\right\} \quad (15)$$

где

$$\chi_e = \frac{k_e}{C_e},\ \ p_0 = -\alpha,\ \ p_1 = -\frac{g + k_e s^2 - k_e \mu_0^2}{C_e},\ \ p_2 = -\frac{g + k_e s^2}{C_e}, \qquad \bar{D}(s) = \frac{r_0^2}{2} e^{-r_0^2 s^2/4},$$

$$\Omega(n) = \frac{e^{nt}}{2\sqrt{n-p_2}}\left[e^{-\frac{z\sqrt{n-p_2}}{\sqrt{\chi_e}}} erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\chi_e t}} - \sqrt{(n-p_2)t}\right) - -e^{\frac{z\sqrt{n-p_2}}{\sqrt{\chi_e}}} erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\chi_e t}} + \sqrt{(n-p_2)t}\right)\right].$$

Используя выражения (14) и (15) мы провели численный расчет поле температуры для пластинки из меди (Cu), для которой теплофизические параметры которой при *T=300 K* приведены в таблице 1. Численные значения μ_0 определяются на основе данных о пробегах ионов урана (U) с энергией 5 МэВ/а.е.м., полученных с помощью программного комплекса SRIM [2, 16]. Результаты расчеты иллюстрированы на рисунках 1.4.

Таблица 1. Теплофизические параметры металлов и параметры ионизационных потерь, применяемые для численных расчетов [2, 21]:

Материал	κ_e [Вт/(м·К)]	κ_i [Вт/(м·К)]	g [$\times 10^{16}$ Вт/(м³·К)]	C_i [$\times 10^6$ Дж/(м³·К)]	C_e [$\times 10^4$ Дж/(м³·К)]	S_e[$\times 10^{-5}$ Дж/м]
Золото	315 [21]	2 [21]	2.3 [2, 18]	2.50 [21]	2.1 [21]	1.59 [2]
Медь	396 [21]	5 [21]	12,7 [2, 14]	3.41 [21]	2.83 [21]	1.17 [2]
Никель	91 [21]	16 [21]	107 [2, 18]	3.91 [120]	31 [21]	1.23 [2]

На рис. 1 показана временная динамика температур для никеля, меди и золота. Графики электронной температуры (T_e) демонстрируют максимальный перегрев в золоте (до 700 000 К) и минимальный в никеле (около 40 000 К), что обусловлено слабой электрон-фононной связью в благородных металлах. Динамика ионной температуры (T_i) показывает

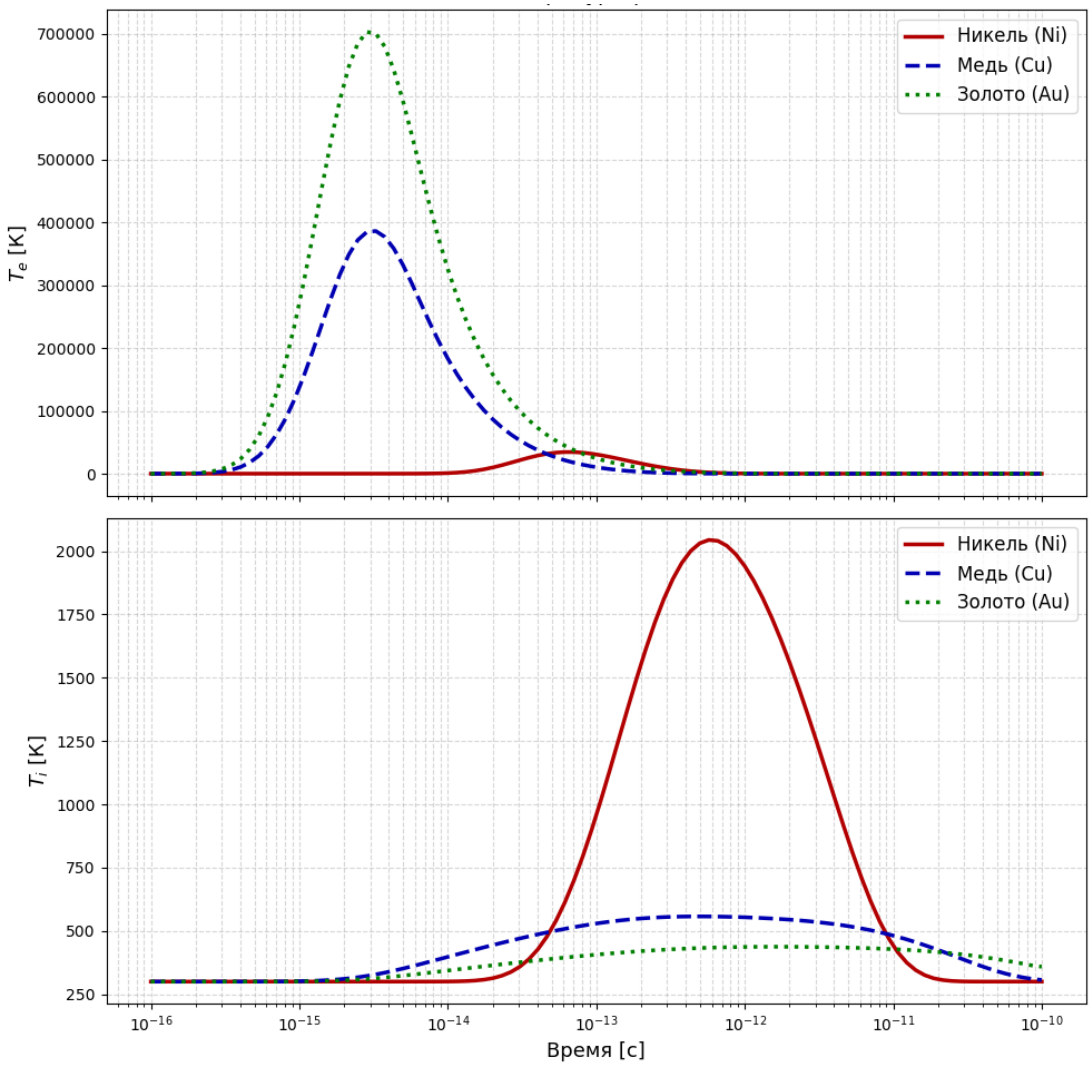


Рис. 1. Сравнительный анализ временной эволюции температур электронной подсистемы T_e (верхний график) и кристаллической решетки T_i (нижний график) для различных металлов (Ni, Cu, Au) на поверхности мишени в центре оси трека ($r = 5r_0,\ z = 0$) с учетом затухания ионизационных потерь по Лямшеву.

обратную картину: сильная связь в никеле обеспечивает быструю передачу энергии и интенсивный нагрев решетки (более 2000 К). В то же время ионные остовы меди и золота нагреваются крайне незначительно (до 550 К и 430 К соответственно) из-за медленной теплопередачи и высокой электронной теплопроводности. Полученные значения находятся в хорошем согласии с результатами экспериментальной работы [9].

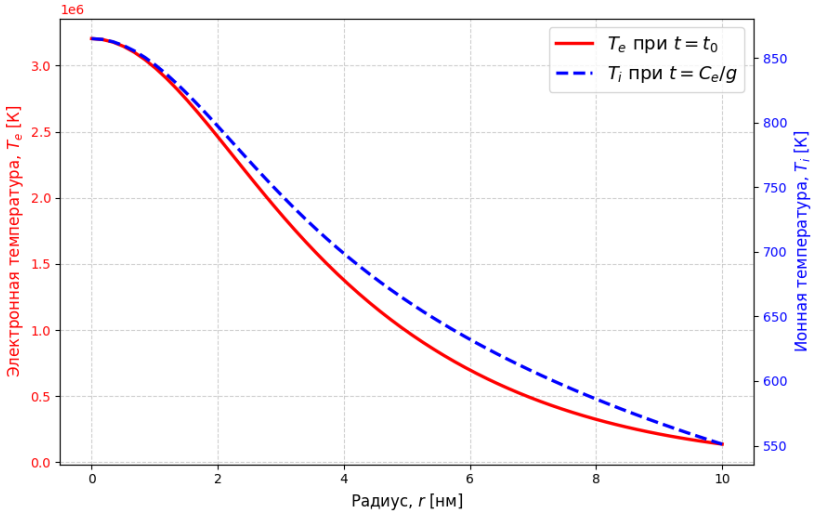


Рис. 2. Радиальные профили температуры электронной подсистемы T_e (сплошная линия) в момент $t = t_0$ и кристаллической решетки T_i (штриховая линия) в момент $t = C_e/g$ для меди (Cu).

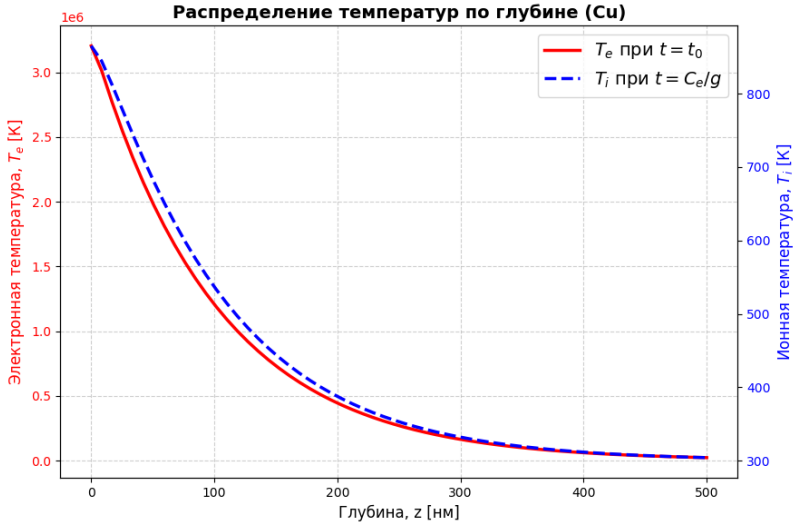


Рис. 3. Распределение температур электронной подсистемы T_e и решетки T_i по глубине мишени z (вдоль оси $r = 0$) в моменты их максимальных значений.

Как следует из рис. 2, радиальные профили электронной (T_e) и ионной (T_i) температур плавно спадают от оси симметрии ($r = 0$) к периферии. Такое экспоненциально-гауссово распределение температурного поля напрямую отражает геометрию источника тепловыделения при воздействии быстрых тяжелых ионов и подтверждает корректность заложенной физической модели.

Рис.3 демонстрирует распределение температур T_e (при $t = t_0$) и T_i (при $t = C_e/g$) по глубине проникновения иона строго по оси трека. Внедрение аппроксимации Лямшева, $\mu(z) = e^{-\mu_0 z}$, в интегральные аналитические решения (14) и (15) позволяет наглядно проследить экспоненциальное затухание температурного поля по мере продвижения иона вглубь мишени. Максимальный разогрев обеих подсистем ожидаемо наблюдается на поверхности облучаемого образца ($z = 0$), после чего происходит их монотонный спад.

В разделе 2.5 предложена упрощённая математическая модель для исследования формирования температурных полей в полубесконечных металлических образцах при воздействии ионного пучка с экспоненциальным временным и гауссовым радиальным распределением энергии, а также поверхностным характером энерговклада.

Математическая постановка задачи базируется на трехмерной системе дифференциальных уравнений модели термического пика (7)-(8). В данном разделе принято следующее упрощение [13, 14]: поскольку $C_e << C_i$ теплопроводностью фононной подсистемы можно пренебречь [14]. Начальные и граничные условия, можно принять в виде [22,23]

$$T_{e,i}^{'}(r,z,0)=0,\ \left.\frac{\partial T_{e,i}^{'}(r,z,t)}{\partial r}\right|_{r=0}=0,\ \left.-\kappa_e\frac{\partial T_{e,i}^{'}}{\partial z}\right|_{z=0}=A_e(r,t), \qquad (2.5.3)$$

Здесь функция пучка ионов примем в следующем виде $A_e(r,t)=b\alpha e^{-\alpha t}e^{-r^2/r_0^2}$. Решение выше сформулированной задачи имеет следующий вид:

$$T_e'(r,z,t)=\frac{\alpha\sigma S_e}{2}\sqrt{\frac{C_i(g-\alpha C_i)}{2\pi\kappa_e}}e^{-\alpha t}\times$$

$$\times\int_0^\infty e^{-\left(\frac{\sigma^2s^2}{4}+\sqrt{\frac{B_e(s)}{\kappa_e}}z\right)}\frac{\sqrt{B(s)}\cdot J_0(rs)\cdot erf\left[\sqrt{\left(\frac{\kappa_e s^2 g}{C_i B_e(s)}-\alpha\right)t}\right]}{\kappa_e s^2 g-\alpha C_i(g+\kappa_e s^2)}sds, \qquad (2.5.4)$$

$$T_i^{'}(r,z,t)=\frac{\alpha\sigma S_e g}{2\sqrt{2\pi\kappa_e}C_i}e^{-\alpha t}\times$$

$$\times\int_0^\infty\frac{J_0(rs)}{\sqrt{g+\kappa_e s^2}}e^{-\left(\frac{\sigma^2s^2}{4}+\sqrt{\frac{B_e(s)}{\kappa_e}}z\right)}\left[\int_0^t e^{\left[\alpha-\frac{g\left(B_e(s)+\kappa_e s^2\right)}{2C_iB_e(s)}\right]\tau}I_0\left(\frac{g^2}{2C_iB_e(s)}\tau\right)d\tau\right]sds. \qquad (2.5.5)$$

где $B_e=g+\kappa_e s^2$, где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого порядка. Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 2.4.

Третья глава посвящена исследованию особенностей генерации акустических волн в металлах под действием импульсных пучков быстрых тяжёлых ионов. На основе совместного решения уравнений термоупругости и МТП с использованием интегральных преобразований Лапласа по времени и Ханкеля по радиальной координате получены аналитические выражения для термоупругих напряжений в полубесконечных металлических мишенях и пластинах конечной толщины. Рассмотрены различные конфигурации пространственно-временного распределения энергии ионного пучка: с экспоненциальным временным и гауссовым радиальным затуханием, а также с учётом затухания электронных потерь по глубине в рамках аппроксимации Лямшева. На основе полученных аналитических выражений выполнен численный расчёт временной и пространственной эволюции акустических импульсов в меди и золоте.

В разделе 3.1 предложена математическая модель для исследования генерации акустических волн в полубесконечных металлических образцах

при воздействии ионного пучка с экспоненциальным временным и гауссовым радиальным затуханием.

Исходные уравнения термоупругости в рамках МТП в этом случае в цилиндрической системе координат, имеет следующий вид [13,24, 25]:

$$\nabla^2\sigma - \frac{1}{v_s^2}\frac{\partial^2\sigma}{\partial t^2} = -\frac{\beta_V}{Kv_s^2}\frac{\partial^2 T_i}{\partial t^2}. \quad (19)$$

v_s - скорость звука в среде, K - модуль изотермического сжатия, β_V - коэффициент объёмного теплового расширения.

Очевидно, что для решения уравнение (19) необходимо иметь явное выражение для нестационарной поле температуры решетки $\hat{T}_i'(s,p)$. Этот выражение нам получен в разделе (2.1) при начальных и граничных условиях (4), и мы здесь их не приводим. Начальные и граничные условия для $\sigma(r,z,t)$ имеют следующий вид [24-26]:

$$\sigma(r,z,0) = 0, \qquad \left.\frac{\partial\sigma(r,z,t)}{\partial t}\right|_{t=0} = 0, \qquad \sigma(r,z,t)|_{z=0} = 0 \quad (20)$$

Выполняя преобразование Лапласа по t и Ханкеля по r от уравнении (19) и используя методом вариации постоянных, получим решением выше сформулированной задач в следующем виде:

$$\sigma(r,z,t) = \frac{bS_e g\beta_V r_0^2}{4C_eC_iK}\int_0^\infty e^{-r_0^2s^2/4}\, J_0(sr)\left[\theta_1(t) - \theta_1\left(t-\frac{z}{v_s}\right)U\left(t-\frac{z}{v_s}\right)\right]sds, \quad (21)$$

где $U(t)$ – функция Хевисайда,

$$\theta_1(t) = \frac{e^{-\alpha t}}{(-\alpha-p_1)(-\alpha-p_2)} + \frac{e^{p_1 t}}{(p_1+\alpha)(p_1-p_2)} + \frac{e^{p_2 t}}{(p_2+\alpha)(p_2-p_1)}.$$

Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 3.3.

В разделе 3.2 предложена математическая модель для исследования генерации акустических волн в металлических пластинках конечной толщины при воздействии ионного пучка с экспоненциальным временным и гауссовым радиальным затуханием.

В рассматриваемом случае исходное уравнение термоупругости принимает вид (19) с учетом начальных и граничных условий:

$$\sigma(r,z,0) = 0, \qquad \left.\frac{\partial\sigma(r,z,t)}{\partial t}\right|_{t=0} = 0, \qquad \sigma(r,z,t)|_{z=0,L} = 0. \quad (21)$$

Используя методом вариации постоянных, получим решением выше сформулированной задач в следующем виде:

$$\sigma(r,z,t) = \frac{bg\beta_V r_0^2}{4C_eC_iK}\int_0^\infty e^{-r_{+0}^2s^2/4}\, J_0(sr)\left[\theta_1(t) - \int_0^t \theta_1(\tau)\theta_2(t-\tau)d\tau\right]sds, \quad (22)$$

где

$$\theta_1(z,t) = \frac{e^{-\alpha t}}{(-\alpha-p_1)(-\alpha-p_2)} + \frac{e^{p_1 t}}{(p_1+\alpha)(p_1-p_2)} + \frac{e^{p_2 t}}{(p_2+\alpha)(p_2-p_1)},$$

$\theta_2(z,t) = \sum_{n=0}^\infty\left[\delta\left(t-\tau_{1,n}\right) - \delta\left(t-\tau_{2,n}\right) + \delta\left(t-\tau_{3,n}\right) - \delta\left(t-\tau_{4,n}\right)\right]$, $\tau_{1,n} = \frac{(2n+1)L-z}{v_s}$, $\tau_{2,n} = \frac{(2n+1)L+z}{v_s}$, $\tau_{3,n} = \frac{2nL+z}{v_s}$, $\tau_{4,n} = \frac{(2n+2)L-z}{v_s}$, $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 3.3.

В разделе 3.3 предложена математическая модель для исследования генерации акустических волн в полубесконечных металлических образцах с учётом затухания электронных потерь энергии по глубине в рамках аппроксимации Лямшева.

Исходным пунктом для определения акустического отклика служит волновое уравнение термоупругости, записанное относительно механического напряжения $\sigma(r,z,t)$. Выражение для нестационарной поле температуры решетки $T_i(r,t)$ был получен в разделе 2.4 при начальных и граничных условиях (4), и мы здесь их не приводим. Начальные и граничные условия для $\sigma(r,z,t)$ примем как (20): используя методом вариации постоянных при начальных и граничных условиях (19), получим решением выше сформулированной задач в следующем виде:

$$\sigma(r,z,t) = \int_0^\infty [\sigma_1(s,z,t) - \sigma_2(s,z,t) - \sigma_3(s,z,t) + \sigma_4(s,z,t)]\, s\, J_0(sr)ds, \quad (2.3)$$

где $\sigma_1(s,z,t) = \frac{\gamma g Q_0 \bar{\Phi}(s)}{C_i C_e} e^{-\mu_0 z} \sum_j A_j e^{p_j t}$, $\sigma_2(s,z,t) = \frac{\gamma g Q_0 \bar{\Phi}(s)}{C_i C_e} H\left(t - \frac{z}{v_s}\right) \sum_j A_j e^{p_j (t - z/v_s)}$, $\sigma_3(s,z,t) = \frac{\gamma g Q_0 \bar{\Phi}(s) \mu_0 v_s^2}{C_i C_e \sqrt{C_e/k_e}} \sum_l B_l \Omega\left(p_l, p_2, z\sqrt{\frac{C_e}{k_e}}, t\right)$, $\sigma_4(s,z,t) = \frac{\gamma g Q_0 \bar{\Phi}(s) \mu_0 v_s^2}{C_i C_e \sqrt{C_e/k_e}}$, $A_j = \frac{-p_j^2}{\prod_{m \neq j}(p_j - p_m)}$ при $j \in \{0,1,3,4,5\}$, $B_l = \frac{-p_l^2}{\prod_{n \neq l}(p_l - p_n)}$ при $l \in \{0,1,3,6,7\}$, $p_0 = -\alpha$, $p_1 = -\frac{g + k_e s^2 - k_e \mu_0^2}{C_e}$, $p_2 = -\frac{g + k_e s^2}{C_e}$, $p_3 = -g/C_i$, $p_4 = \mu_0 v_s$ и $p_5 = -\mu_0 v_s$, $p_{6,7} = \frac{v_s^2 C_e}{2k_e} \pm \sqrt{\left(\frac{v_s^2 C_e}{2k_e}\right)^2 - \frac{v_s^2 C_e}{k_e} p_2}$.

Используя выражения, мы провели численный расчет временного и пространственного распределения акустического сигнала в пластинки из меди (Cu), теплофизические параметры которой при *T=300 K* приведены в таблицах 1 и 2 [21, 27]. Следуя [22-26] для параметров пучка примем следующие значения: $t_0 = 1$ фс, $r_0 = 2$нм. Результаты численного расчета иллюстрированы на рисунках 5 - 6.

Таблица 2. Теплофизические параметры металлов, используемые в численных расчетах[21].

Метал	K [$\times 10^{-12}$ *м·с²·кг⁻¹*]	β_V [$\times 10^{-6}$ *K⁻¹*]	v_s [$\times 10^{3}$ *м·с⁻¹*]
Медь (Cu)	*7.30*	*50.1*	*4.70*
Золото (Au)	*5.77*	*42.6*	*3.24*

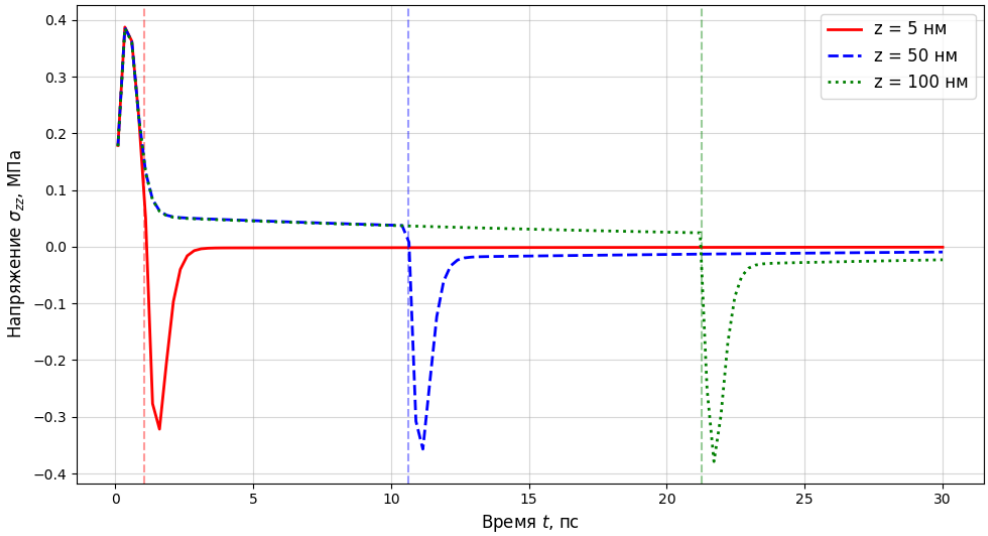


Рисунок 5. Временная зависимость нормальной компоненты МН σ_{zz} в медной мишени (Cu) на оси трека ($r = 400$ нм) на сверхмалых глубинах z = 5, 50, 100 нм.

Как показано на рис. 5, динамика ТУН определяется суперпозицией локального теплового расширения и волны разгрузки. Изначальный резкий скачок напряжения, вызванный быстрым нагревом, инвертируется в момент времени $t = z/v_s$ из-за прихода компенсационного импульса от свободной поверхности ($z = 0$). Наблюдаемый временной сдвиг пиков при увеличении глубины z наглядно подтверждает конечную скорость распространения акустической волны.

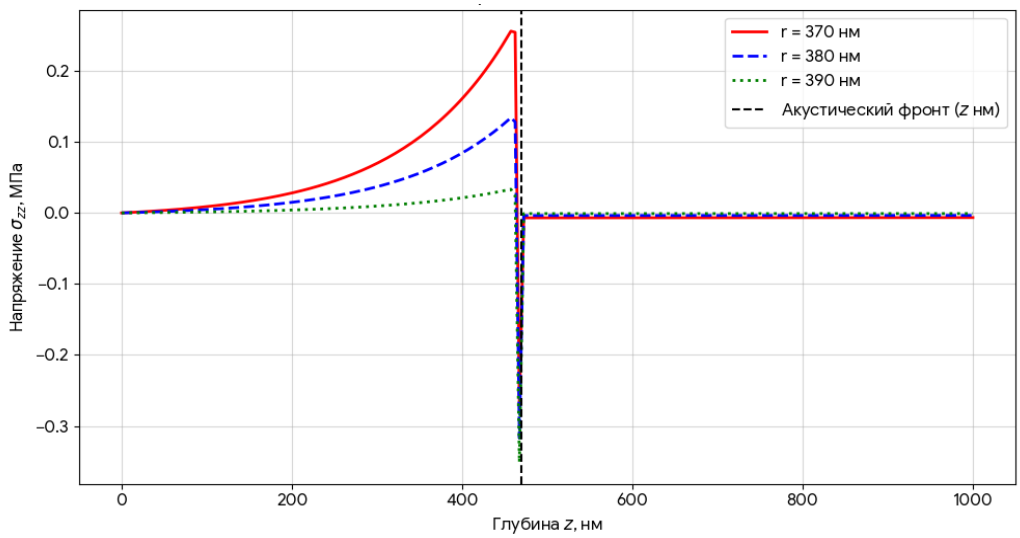


Рисунок 6. Пространственное распределение ТУН σ_{zz} по глубине z в полубесконечной медной мишени (Cu) в момент времени $t = 100$ пс для различных радиальных расстояний ($r = 370$ нм, 380 нм, 390 нм).

Из рис. 6 отчетливо виден фронт акустической волны, положение которого строго соответствует скорости продольного звука в материале. Характерный биполярный профиль импульса (сжатие-растяжение) формируется за счет суперпозиции локального термического давления и волны разгрузки, отраженной от свободной поверхности мишени ($z = 0$).

Снижение амплитуды напряжения при увеличении расстояния от оси трека (кривые для r = 370, 380 и 390 нм) наглядно демонстрирует цилиндрическую расходимость упругого поля.

В разделе 3.4 предложена упрощённая математическая модель для исследования генерации акустических волн в полубесконечных металлических образцах под действием ионного пучка с экспоненциальным временным и гауссовым радиальным затуханием при эффективном поверхностном энерговкладе. Численные расчеты температурных полей для данного раздела проведены и проанализированы по аналогии с результатами раздела 3.3.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе разработанной аналитической модели и решения системы уравнений в рамках двухтемпературного приближения установлено, что пространственно-временная эволюция ТП в металлах критически зависит от нестационарной динамики межподсистемного теплопереноса. Показано, что интенсивность электрон-фононного взаимодействия определяет скорость релаксации энергии от высоковозбужденного электронного газа к кристаллической решетке, выступая главным фактором формирования термического пика.

2. Теоретически показано, что учет пространственно-временного распределения энергии пучка БТИ выявляет сильную нелинейную зависимость пиковых значений температур от длительности радиационного воздействия. Аналитические расчеты демонстрируют, что сокращение времени энерговклада приводит к резкому росту максимальной температуры электронной подсистемы, в то время как инерционность разогрева самой решетки лимитируется механизмами электронной и решеточной теплопроводности.

3. Выявлено, что распределение ТП локальной зоне нагрева носит существенно неоднородный характер, экспоненциально затухая по глубине мишени и подчиняясь гауссовому закону в радиальном направлении. Возникающий вследствие этого пространственный градиент температур выступает фундаментальной причиной и первичным источником формирования значительных по величине нормальных ТУН вдоль оси ионного трека.

4. В рамках единого теоретического подхода строго описан механизм трансформации тепловой энергии локального термического пика в высокочастотные упругие волны. Показано, что термоупругий отклик металла на импульсное воздействие тяжелых ионов формируется, как сложная суперпозиция мгновенного теплового расширения решетки, учитывающая эффекты ее ангармонизма, и встречных релаксационных процессов.

5. Выявлено, что из-за ТУН возникают локальные зоны с экстремальными амплитудными значениями напряжений сжатия и растяжения и, в результате, формируется биполярный АИ. Расчеты

подтверждают, что в непосредственной близости от оси трека амплитуда генерируемых МН способна превышать динамический предел упругости материала, что создает необходимые теоретические предпосылки для объяснения наблюдаемого в экспериментах формирования локальных зон пластической деформации.

6. Сопоставление результатов разработанной аналитической модели термоупругого отклика с доступными экспериментальными данными по облучению металлов, показавшее их высокую степень сходимости. Показано, что параметры генерируемых АВ адекватно отражают кинетику термического пика и микроструктурные особенности материала, что теоретически обосновывает применимость данной модели для развития современных методов неразрушающей акустической диагностики радиационной стойкости.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Каганов, М.И. Релаксация между электронами и решеткой / М.И. Каганов, И.М. Лифшиц, Л.В. Танатаров // ЖЭТФ. –1956. –Т. 31. –№ 2(8). –С. 232-237.
2. Wang, Z.G. The Se sensitivity of metals under swift heavy ion irradiation: a transient thermal process / Z.G. Wang, C. Dufour, E. Paumier, M. Toulemonde // Journal of Physics: Condensed Matter. –1994. –Vol. 6. –P. 6733-6750.
3. Комаров, Ф.Ф. Модель термического пика для описания трекообразования в кристаллах полупроводников, облучаемых тяжелыми высокоэнергетическими ионами / Ф.Ф. Комаров, В.Н. Ювченко // Журнал технической физики. –2003. –Т. 73. –№ 6. –С. 56-60.
4. Комаров, Ф.Ф. Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при облучении ионами сверхвысоких энергий / Ф.Ф. Комаров // УФН. –2003. –Т. 173. –№ 12. –С. 1287-1318.
5. Амирханов, И.В. Численное исследование температурных эффектов в материалах при облучении их тяжелыми ионами высоких энергий в рамках уравнений теплопроводности для электронов и решетки / И.В. Амирханов, А.Ю. Дидык, Е.В. Земляная, И.В. Пузынин и др. // ЭЧАЯ. –2006. –Т. 3. –№ 1(130). –С. 63-75.
6. Шарипов, З.А. Моделирование тепловых процессов в материалах при облучении тяжелыми ионами высоких энергий в рамках обобщенной модели термического пика / З.А. Шарипов // Труды XII научной конференции молодых ученых. –Дубна. –2008. –С. 71-74.
7. Dufour, C. Ion-matter interaction: the three-dimensional version of the thermal spike model. Application to nanoparticle irradiation with swift heavy ions / C. Dufour, V. Khomenkov, G. Rizza, M. Toulemonde // Journal of Physics D: Applied Physics. –2012. –Vol. 45. –No. 6. –Article 065302. [DOI: 10.1088/0022-3727/45/6/065302]
8. Wesch, W. Ion Beam Modification of Solids: Ion-Solid Interaction and Radiation Damage / W. Wesch, E. Wendler. –Springer Series in Surface Sciences. –2016. –534 p.
9. Stodel, C. Thermal spike model applied to thin targets irradiated with swift heavy ion beams at few mega-electron-volt per nucleon energies / C. Stodel, M. Toulemonde, C. Fransen, B. Jacquot, G. Fremont, M. Michel, C. Dufour // EPJ Web of Conferences. –2020. –Vol. 229. –Article 05001.
10. Залюбовский, И.И. Введение в радиационную акустику / И.И. Залюбовский, А.И. Калиниченко, В.Т. Лазурик. –Харьков: Вища школа. –1986. –168 с.
11. Лямшев, Л.М. Радиационная акустика / Л.М. Лямшев. –М.: Наука-Физматлит. –1996. –304 с.
12. Комаров, Ф.Ф. Термоупругая генерация продольных акустических колебаний вблизи ионных треков / Ф.Ф. Комаров, А.И. Урбанович, В.А. Ювченко // Доклады НАН Беларуси. –2006. –Т. 50. –№ 3. –С. 37-43.
13. Калиниченко, А.И. Возбуждение упругих волн в твердом теле импульсным пучком нерелятивистских ионов / А.И. Калиниченко, В.Е.

Стрельницкий // Вестник Харьковского национального университета. Серия физическая "Ядра, частицы, поля". –2010. –Т. 46. –№ 2. –С. 35-43.
14. Амирханов, И.В. Модельное описание термоупругих напряжений в материалах при облучении тяжёлыми ионами высоких энергий / И.В. Амирханов, А.Ю. Дидык, Д.З. Музафаров, И.В. Пузынин, Т.П. Пузынина, Н.Р. Саркар, И. Сархадов, З.А. Шарипов // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. –2010. –№ 3-2. –С. 68-71.
15. Амирханов, И.В. Исследование термоупругих эффектов в металлах в рамках модифицированной модели термического пика / И.В. Амирханов, И.В. Пузынин, Т.П. Пузынина, И. Сархадов // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. –2013. –№ 2. –С. 77-84.
16. Deurvorst, F.R. A spatial and temporal characterisation of single proton acoustic waves in proton beam cancer therapy / F.R. Deurvorst, G. Collado Lara, A. Matalliotakis et al. // Journal of the Acoustical Society of America. –2022. –Vol. 151. –No. 2. –P. 1200-1210.
17. Darkins, R. Modelling radiation effects in solids with two-temperature molecular dynamics / R. Darkins, D.M. Duffy // Computational Materials Science. –2018. –Vol. 147. –P. 145-153.
18. Dufour, C. A high-resistivity phase induced by swift heavy-ion irradiation of bismuth: a probe for thermal spike damage / C. Dufour, A. Audouard, F. Beuneu, E. Paumier, M. Toulemonde // Journal of Physics: Condensed Matter. –1993. –Vol. 5. –No. 26. –P. 4573-4584.
19. Анисимов, С.И. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко; Под ред. А.М. Бонч-Бруевича, М.А. Ельяшевича. –Москва: Наука. –1970. –272 с.
20. Ziegler, J.F. SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010) / J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. –2010. –Vol. 268. –P. 1818-1823.
21.Бабичев, А.П. Физические величины / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. –М.: Энергоатомиздат. –1991. –1232 с.
22.Индейцев, Д.А. Двухтемпературная модель оптического возбуждения звука в проводниках / Д.А. Индейцев, Е.В. Осипова // ДАН. –2017. –Т. 473. –№ 2. –С. 1-5.
23,Yilbas, B.S. Laser Pulse Heating of Surfaces and Thermal Stress Analysis / B.S. Yilbas, A.Y. Al-Dweik, N. Al-Aqeeli, H.M. Al-Qahtani. –Springer International Publishing. –2014. –185 p.
24.Shmidberskaya, A.A. Study of temperature fields under impact of fine-focused heavy ion beam onto metal substrates structure / A.A. Shmidberskaya, P.A. Shmidberskiy, R.L. Plomodyalo // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2018. –Vol. 327. –No. 2. –Article 022081.
25. Залюбовский, И.И. Введение в радиационную акустику / И.И. Залюбовский, А.И. Калиниченко, В.Т. Лазурик. –Харьков: Вища школа. –1986. –168 с.

26.Deurvorst, F.R. A spatial and temporal characterisation of single proton acoustic waves in proton beam cancer therapy / F.R. Deurvorst, G. Collado Lara, A. Matalliotakis et al. // Journal of the Acoustical Society of America. –2022. – Vol. 151. –No. 2. –P. 1200-1210.
27.Амирханов, И.В. Численное исследование температурных эффектов в материалах при облучении их тяжелыми ионами высоких энергий в рамках уравнений теплопроводности для электронов и решетки / И.В. Амирханов, А.Ю. Дидык, Е.В. Земляная, И.В. Пузынин и др. // ЭЧАЯ. –2006. –Т. 3. –№ 1(130). –С. 63-75.
28.Cheblukov, Yu.N. Sputtering of metals by heavy ions in the inelastic energy loss range / Yu.N. Cheblukov, A.Yu. Didyk, A. Khalil, D. Hofmann // Vacuum. – 2002. –Vol. 66. –P. 133-136.

Список публикаций по теме диссертации

[1-А]. **Исматов, Т.Н.** Нестационарное температурное поле поверхности металлов при непрерывном облучении сильноточными ионами / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Вестник ТНУ. Серия естественных наук. –Душанбе. –2019. –№ 1. –С. 113-117.

[2-А]. **Исматов, Т.Н.** Температурное поле металлов в поле гауссового импульса пучка ионов по "радикальной" модели взаимодействия / Т.Х. Салихов, Т.Н.Исматов // ДАН РТ. –Душанбе. –2019. –Т. 62. –№ 9-10. –С. 555-560.

[3-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории формирования температурного поля металлов в поле гауссового пучка ионов / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Вестник ТНУ. Серия естественных наук. –Душанбе. –2020. –№ 4. –С. 136-141.

[4-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории формирования поля температуры в металлах под действием пучка быстрых тяжелых ионов / Т.Н. Исматов // Вестник ТНУ. Серия естественных наук. –Душанбе. –2021. –№ 1. –С. 136-144.

[5-А]. Исматов, Т.Н. К теории формирования поля температуры в металлах под действием пучка быстрых тяжелых ионов / Т.Н. Исматов // Вестник ТНУ. Серия естественных наук. –Душанбе. –2023. –№ 3. –С. 169-178.

[6-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории генерации акустических волн в металлах под действием пучка быстрых тяжёлых ионов / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // ДАН РТ. –Душанбе. –2024. –Т. 67. –№ 11-12. –С. 551-557.

[7-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории формирования температурных поля и акустических колебаний в металлах под действием гауссового импульса пучка ионов / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Вестник ТНУ. Серия естественных наук. –Душанбе. –2025. –№ 3. –С. 108-118.

Публикации в материалах научных конференций

[8-А]. **Исматов Т.Н.** Радиальное распределение нестационарного температурного поля поверхности металлов при непрерывном облучении ионами / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Матер. VI-ой межд. конф. «Современные проблемы физики». –Душанбе. –2018. –С. 27-28.

[9-А]. **Исматов, Т.Н.** Радиальное распределение нестационарного температурного поля поверхности металлов при облучении гауссовым импульсом потока ионов / Т.Х. Солихов, Т.Н. Исматов // Матер. респуб. научно-теорет. конф. ППС и сотрудников ТНУ. –Душанбе. –2019. –С. 367-368.

[10-А]. **Исматов, Т.Н.** Радиальное распределение температурного поля поверхности металлов при облучении прямоугольным импульсом потока ионов / Т.Х. Солихов, Т.Н. Исматов // Матер. IV-ой межд. научн. конф.: «Вопросы физической и координационной химий». – Душанбе. –2019. –С. 337-339.

[11-А]. **Исматов, Т.Н.** Особенности формирование поле температуры в металлах при облучение гауссовой формой пучка ионов / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматова // Матер. респуб. НПК ППС и сотрудников ТНУ. –Душанбе. –2020. –С. 396-397

[12-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории формирования температурного поля металлов в поле гауссового пучка ионов / Т.Х. Солихов, Т.Н. Исматов // Матер. респуб. НПК «Современные проблемы теории дифференциальных уравнений», посвящ. 80-летию профессора М.Исмати. –Душанбе. –2020. –С. 219-222.

[13-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории формирования поля температуры в металлических пластинах при облучении экспоненциальными импульсами ионного пучка / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Сборник статей II-ой межд. НПК на тему «О применении дифференциальных уравнений при решении прикладных задач». –Душанбе. –2021. –С. 149-152.

[14-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории формирования поля температуры в металлических пластинах при облучении импульсами ионного пучка / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Матер. респуб. научно-теорет. конф. ППС НИИ ТНУ. –Душанбе. –2022. –С. 95-99.

[15-А]. **Исматов, Т.Н.** К теории генерации акустических волн в металлах под действием пучка быстрых тяжелых ионов / Т.Н. Исматов, Т.Х. Салихов // Матер. респуб. НПК “Развитие и достижения физической науки в годы независимости”. –Душанбе. –2023. –С. 123-125.

[16-А]. **Исматов, Т.Н.** Влияние пространственного ослабления энергии пучка быстрых тяжелых ионов на формирование температурного поле в металлах / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматов // Матер. межд. НПК на тему «Развитие новых направлений в химии и химической технологии». – Душанбе. –2023. –С. 126-130.

[17-А]. **Исматов, Т.Н.** Особенности возбуждение акустических волн в металлах импульсным пучком ионов / Т.Х. Салихов, Т.Н. Исматова // Матер. респуб. научно-теоретической конф. ППС НИИ ТНУ. – Душанбе. – 2025. –С. 57-61.