#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

#### Институт <u>Физико-технический</u> Направление подготовки <u>14.04.02</u> Ядерные физика и технологии Кафедра <u>Физико-энергетические установки</u>

#### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Модифицирование конструкционного алюминия воздействием мощного ионного

пучка

УДК <u>669.71:359.16.04:621.039.8</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Пименов Э.Ю.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ФЭУ	Ю.В. Данейкин	к.физмат. наук		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ:

#### По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.экон.н		

#### По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.фм.н.		

#### допустить к защите:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ ФТИ	Долматов О.Ю.	к.фм.н.,		
		доцент		

## Планируемы результаты обучения

Код	Ρουντι τοτ οδυμομμα			
результата	т сзультат обучения			
	Профессиональные компетенции			
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально- экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной и термоядерной энергии, ядерных и термоядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных и термоядерных материалов, технологий радиационной безопасности, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.			
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной и термоядерной энергии, ядерных и термоядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, изотопных технологий и материалов.			
Р3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.			
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.			
P5	Оценивать перспективы развития ядерной и термоядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.			
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.			
	Общекультурные компетенции			
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.			
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.			
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.			
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.			

#### Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физико-технический Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии Кафедра Физико-энергетические установки

### УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ФЭУ Долматов О.Ю. (Ф.И.О.)

(Подпись) (Дата)

#### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:					
Группа		ФИО			
0AM5B	Пименов Э.Ю.				
Тема работы:	Тема работы:				
Модифицирование конструкционного алюминия воздействием мощного ионного пучка					
Утверждена приказом проректора-директора №3673/с от 24.05.2017					
(директора) (дата, номер)					

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2017

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАЛАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования является, система
	«мощный ионный пучок-металл», а конкретнее
	процессы, протекающие в системе, которые
	приводят к модифицированию поверхностных и
	глубинных слоёв. В качестве мишени выбран
	алюминий. Интенсивность (плотности мощности)
	ионного пучка в диапазоне от $10^7$ до $10^{10}$ Вт/см <sup>2</sup> .
Перечень подлежащих исследованию,	- Проведение литературного обзора по тематике
проектированию и разработке	НИР;
вопросов	- Представление результатов математического
	моделирования процессов, протекающих в системе
	«МИП-металл»;
	- Рассмотрение особенностей импульсов
	механических возмущений;
	- Установление режимов генерации ударно-
	волнового возмущения;
	- Исследовать влияние компонентного состава
	ионного пучка на характеристики ударно-
	волнового возмущения;
	- Анализ полученных данных.
Перечень графического материала	- Презентация;
(с точным указанием обязательных чертежей)	- Чертеж ускорителя ТЕМП-4М.

Консультанты по разделам в	зыпускной квалификационной работы
Раздел	Консультант
Литературный обзор,	Данейкин Ю.В.
проведение численного	
эксперимента и анализ	
полученных результатов	
Финансовый менеджмент,	Верховская М.В.
ресурсоэффективность и	
ресурсосбережение	
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которы	ые должны быть написаны на русском и иностранном
языках:	
Реферат	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной	
квалификационной работы по линейному графику	

### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ФЭУ	Ю.В. Данейкин	к.физмат. наук		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Пименов Э.Ю.		

#### ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Студенту.	
Группа	ФИО
0AM5B	Пименов Э.Ю.

	Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ	
	Уровень	N4		14.04.02 Ядерные	
0	бразования	Магистратура	Направление/специальность	физика и технологии	
И	сходные да	нные к разделу «Финансовый	й менеджмент, ресурсоэфф	ективность и	
pe	есурсосбере	ежение»:			
<ol> <li>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</li> </ol>		есурсов научного исследования иально-технических, энергетических, , информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.		
2.	Нормы и нор	омативы расходования ресурсов			
<ol> <li>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</li> </ol>		ия система налогообложения, ставки ислений, дисконтирования и я			
Π	еречень во	просов, подлежащих исследов	занию, проектированию и	разработке:	
<ol> <li>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</li> </ol>		иерческого потенциала, ости и альтернатив проведения НИ с урсоэффективности и ежения	Оценочная карта конкурентных	к технических решений.	
2.	Планировани	ие и формирование бюджета	– иерархическая структура рабо	DT;	
	научных исс	ледований	– SWOT-анализ;		
3.	<ol> <li>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования</li> </ol>		– календарный план-график рег Определение ресурсоэффектин	лизации проекта. вности проекта.	
Π	Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)				
1. 2. 3. 4. 5. 6.	Оценочная н Матрица SW Иерархичест Календарны Бюджет про Определени	карта конкурентных технических решо /ОТ кая структура работ й план проекта екта е ресурсоэффективности проекта	ений		

Дата выдачи задания для раздела по	
линейному графику	

#### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Пименов Э.Ю.		

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Пименов Э.Ю.

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Hormon zouvo/ouovuo zo vooza	14.04.02 Ядерные
		направление/специальность	физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:				
<ol> <li>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</li> </ol>	<ul> <li>вредных факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> </ul>			
	<ul> <li>– опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>			
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных	– электробезопасность;			
dokymentob no teme	– пожаробезопасность;			
	– требования при работе на ПЭВМ.			
Перечень вопросов, подлежащих исследованию,	проектированию и разработке:			
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей	<ul> <li>воздействие на организм человека;</li> </ul>			
последовательности:	– приведение допустимых норм;			
	– предлагаемые средства защиты.			
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> </ul>			
	<ul> <li>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>			

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику					
Задание выдал ко	Задание выдал консультант:				
Должность		ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ		Гоголева Т.С.	к.фм.н.		
Задание принял к исполнению студент:					
Группа		ФИО		Подпись	Дата
0AM5B		Пименов Э.Ю.			

#### РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 108 с., 22 рис., 16 табл., 156 источников, 2 прил.

Ключевые слова: импульсный пучок заряженных частиц; мишень; конструкционный алюминий; плазмообразование; модифицирование; абляция; ударная волна; мощный ионный пучок; ударно-волновое возмущение; импульс механической нагрузки.

Объектом исследования является система «мощный ионный пучокметалл» энергии в широком диапазоне плотности мощности от 10<sup>7</sup> до 10<sup>10</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

Цель работы – определение характерных особенностей ударноволнового возмущения в системе «МИП-металл», установление взаимосвязи с параметрами интенсивного ионного пучка и модифицирующим эффектом.

В процессе исследования были изучены гидродинамические коды, реализующие модель упруго пластической среды, проведён анализ литературных источников, наиболее ярко отражающих тематику исследования, проведен численный эксперимент по воздействию интенсивным ионным пучком на алюминиевую мишень, определены и рассмотрены режимы генерации ударно-волнового возмущения, изучены характерные особенности импульсов механических нагрузок, а также влияние компонентного состава интенсивного ионного пучка на ударно-волновые характеристики. Определены модифицирующие эффекты. Произведен расчет стоимости выполнения ВКР, оценена ресурсоэффективность выбранного технического; соблюдены все требования по охране труда при выполнении данной работы.

В результате исследования было установлено наличие следующих режимов генерации УBB: абляционный, термоупругий и переходный. Установлены УBB, приводящие К модификации параметры мишени. Установлено, что существует возможность формирования как биполярной, так возмущения. однополярной, структуры импульса механического И

Установлены границы области параметров пучка, при которых биполярное возмущение в фазе «разрежение» имеет превосходящую предел текучести по модулю амплитуду. В данной области установлена возможность реализации откольного явления на переднем фронте облучаемой мишени.

Степень внедрения: высокая; проект может использоваться в настоящее время, при продолжении дальнейших исследований.

Область применения: модификация конструкционных металлов, прогнозирование эффектов при воздействии МИП на металлы.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Статический предел текучести – пороговое сдвиговое напряжение, при превышении которого начинается процесс пластической деформации – движения дефектов.

Тепловое упрочнение – увеличение динамического предела текучести с ростом температуры, связано с ростом величины фононного трения дислокаций.

Динамический предел текучести – максимальное сдвиговое напряжение, фиксируемое в материале в условиях динамической релаксации; всегда больше статического предела текучести и зависит от скорости деформации.

Динамическое разупрочнение – уменьшение динамического предела текучести с ростом плотности дислокаций, обусловлено повышением скорости пластической деформации.

Деформационное упрочнение – увеличение статического (и динамического) предела текучести с ростом степени пластической деформации и связанного с ним увеличения плотности дислокаций.

Пластическая деформация – внутренние процессы движения дефектов в материале (дислокаций, границ зерен), приводящие к релаксации сдвиговых напряжений, превышающих определенный уровень.

СЭП – сильноточный электронный пучок.

МИП – мощный импульсный пучок ионов.

LEHCPEВ – низкоэнергетический сильноточный импульсный электронный пучок.

НРРІВ – импульсный ионный пучок высокой мощности.

ИПЗЧ – импульсный пучок заряженных частиц.

УВВ – ударно-волновое возмущение.

кэВ – килоэлектронвольт.

### Оглавление

ВВЕДЕНИЕ11
1 Аналитический обзор литературных источников18
1.1 Ионное легирование
1.1.1 Торможение в конденсированной среде ускоренных ионов
1.1.2 Значимые эффекты при облучении ускоренными ионами конденсированных сред
1.1.2.1 Эффекты воздействия, протекающие в зоне пробега ионов протяжённостью в
несколько средних проективных пробегов
1.1.2.2 Эффекты воздействия в зоне проникновения ионов, а также ближайшей её
окрестности глубиной от 1 до 10 средних проективных пробегов
1.1.2.3 Эффекты воздействия в слоях мишени глубиной, в тысячи раз превышающей
средние проективные пробеги ионов
1.2 Анализ эмпирических данных по изменению структуры и характеристик веществ
при ионном облучении на глубине, существенно превосходящей $\boldsymbol{R}_p$
1.3 Радиационно-динамическое воздействие на вещество пучков заряженных частиц30
1.3.1 Формирование послекаскадных ударных волн в ходе эволюции плотных
каскадов атомных столкновений
1.4 Краткий обзор данных по воздействию ионной бомбардировки на структуру и
характеристики алюминия
1.4.1 Модификация структуры и свойств алюминия и его сплавов мощными
импульсными и высокоэнергетическими пучками ионов
2 Взаимодействие мощных ионных пучков с металлическими поглотителями41
2.1 Описание системы «МИП-металл»
2.2 Результаты и обсуждения46
2.3 Динамика формирования импульса механических возмущений в металлической
мишени при воздействии протонно-углеродного пучка
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

3.1.2 SWOT-анализ	
3.2 Планирование управления научно-техническим проектом	
3.2.1 Иерархическая структура работ проекта	
3.2.2 Контрольные события проекта	
3.2.3 План проекта	
3.3 Бюджет научного исследования	
3.3.1 Расчёт материальных затрат	67
3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	
3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	
3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды	71
3.3.6 Накладные расходы	71
3.4 Организационная структура проекта	72
3.5 Матрица ответственности	
3.6 Определение сравнительной эффективности исследования	
4 Социальная ответственность	77
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней	опасного и
вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	
4.2.1 Организационные мероприятия	
4.2.2 Технические мероприятия	
4.2.3 Условия безопасной работы	
4.3 Электробезопасность	
4.4 Пожарная и взрывная безопасность	
Заключение	
Список публикаций	
Список используемых источников	
Приложение А	
Приложение Б	

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Бурное развитие большими темпами современных технологий, модификация уже имеющихся ядерных энергетических установок и большие прорывы в создании термоядерных аппаратов предъявляют жёсткие требования к конструкционным материалам, которые должны выработать полный ресурс при мощных внешних радиационных воздействиях. Стремительное развитие мировой и отечественной энергетики, преимущественно связанное с развитием ядерных реакторов нового поколения, реализацией замкнутого ядерного топливного цикла и проектированием термоядерных установок, побудило пристальное внимание обратить на изучение конструкционных материалов и воздействии интенсивного поведения ИХ при высокоэнергетического облучения, сопровождающего генерацию энергии в ядерных и термоядерных реакциях. Нехватка знаний о радиационных воздействиях на конструкционные причиной материалы часто является сдерживания темпов развития современных и радиационных технологий, а также ядерных и термоядерных установок.

Изменения физических свойств конструкционных материалов при облучении их в энергетических установках на сегодняшний день представляет собой не решенную до конца задачу. Прежде всего это связывается со сложностью физических процессов, совместно протекающих в материале при мощном энергетическом воздействии. При проектировании действующих установок приходится сталкиваться с трудностями как технического, так и принципиального характера. Большинство материалов, которые используются при изготовлении различных конструктивных узлов и рабочих частей энергетических ядерных и термоядерных установок, подвержены воздействию мощных энергетических потоков. Энергетическое воздействие на материалы, определяет изменение их структуры, прочностных, электрических и других свойств.

Проблема модифицирования и улучшения свойств, имеющихся на данный момент или создания новых радиационно-стойких конструкционных материалов играет существенную роль в дальнейшем развитии человечества в освоении источников термоядерной и ядерной энергии. Является необходимым детальное понимание физических процессов в системе «конструкционный материал – концентрированный поток энергии», и на основе понимания действия на конструкционный материал совместно протекающих в нём процессов при облучении концентрированным потоком энергии создание материалов, которые способны выдержать интенсивное высокоэнергетичное воздействие в течение длительного времени.

Воздействие концентрированных потоков энергии КПЭ на элементы протеканием большого конструкции сопровождается числа взаимообусловленных процессов. В том числе: релаксация внутренней и кинетической энергии потока внутреннюю энергию BO вещества формирование области конструкционных материалов; локальной энерговыделения; протекание фазовых переходов в области энерговыделения; образование приповерхностного плазменного (вещество конструкционного материала) слоя; генерация импульсов механических возмущений вблизи поверхности испытывающей воздействие; эволюция ударных и акустических волн в объеме материала. Эти процессы обуславливают эрозию поверхностных слоев элементов конструкции, а также объемную модификацию физикомеханических свойств конструкционного материала.

Одним из направлений получения новых данных о закономерностях поведения конструкционных материалов ядерных и термоядерных установок, испытывающих высокоэнергетическое воздействие, является имитационное моделирование помощью импульсных пучков заряженных с частиц. Воздействие ИПЗЧ на вещество мишени сопровождается теми же процессами, воздействие интенсивного высокоэнергетического облучения. В что И частности при использовании мощных ионных пучков параметры воздействия области (уровень подводимой энергии, геометрические размеры

энерговыделения, амплитудно-временные параметры импульсов механических возмущений) сравнимы с таковыми при воздействии характерных для ядерных и термоядерных установок КПЭ (КПЭ ЯТУ). Проведение экспериментов на ионов требуют значительно меньших импульсных ускорителях затрат материальных и трудовых ресурсов по сравнению с экспериментами на ядерных и термоядерных установках. Имитационное моделирование является апробированных исследований области одним ИЗ методов В высокоэнергетических воздействий. Например, ИПЗЧ широко применялись при исследованиях поражающих факторов ядерных взрывов.

Современный пучковых уровень технологий предопределяет перспективность имитационных экспериментов с использованием МИП. Существующие ускорительные комплексы позволяют получать пучки с возможность мобильное параметрами, определяющими проводить имитационное моделирование воздействия на материалы плазмы термоядерного диапазона энергии. Для осуществления имитационных экспериментов актуальным и необходимым является получение взаимосвязи параметров и критериев взаимного подобия результатов мощного ионного и интенсивного высокоэнергетичного облучения.

Для установления закономерностей процессов, протекающих в системах «МИП – конструкционный материал» и «КПЭ ЯТУ – конструкционный материал» и определения критериев их подобия предлагается использование методов численного моделирования. Для выбора амплитудно-временных параметров МИП, имитирующего воздействие КПЭ ЯТУ, предполагается динамические дифференциальные распределения получить параметров вещества, обусловленные сочетанным протеканием всей совокупности процессов в обеих системах. Варьируя параметры МИП, необходимо обеспечить качественное И количественное соответствие амплитудновременных параметров импульсов механической нагрузки, генерируемых у облучаемой поверхности, а также геометрических И динамических характеристик плазменного слоя, образующегося из вещества в пограничной

области. Решение данной задачи возможно только в рамках численного эксперимента, позволяющего максимально детализировать результаты воздействия.

Использованы оригинальные специализированные пакеты программ моделирования упруго–пластических, гидродинамических и плазменных процессов, сопровождающих воздействие на мишень импульсных потоков энергии длительностью (10<sup>-9</sup> – 10<sup>-6</sup>) с и плотности мощности (10<sup>7</sup> – 10<sup>10</sup>) Вт/см<sup>2</sup>. Особенностями являются корректное описание процессов в области фазовых переходов и учет реальных амплитудно–временных и пространственных параметров импульсного воздействия. Функция источника энерговыделения в мишени определяется при учете всех особенностей взаимодействия ионов, электронов и электромагнитного излучения с веществом во всем диапазоне изменения термодинамических параметров.

Объектом исследования является система «мощный импульсный поток энергии – вещество», которая характеризуется экстремально высокими плотностями мощности воздействия. Данная система описывается множеством параметров, что связывается с высокой вероятностью последовательного возбуждения и протекания плазменных, жидкофазовых, а также твердотельных процессов. Сложность создания компьютерных моделей такой системы обуславливается сегодняшний завершённого отсутствием на день теоретического описания разного рода физических явлений, протекающих в зоне промежуточных состояний вещества, таких как существование бинарных состояний вещества, фазообразование И плавление. Также остается невыясненным воздействие каждого из приведённых выше явлений на развитие упругих, пластических, упруго-пластических, гидро- и газодинамических объеме Обычно процессов, протекающих В вещества. подвергаются рассмотрению лишь частные аспекты проблемы: элементарные процессы воздействия пучков заряженных частиц на мишени; теплофизические процессы, сопровождающиеся объемным энерговыделением; радиационное инициирование звуковых волн.

Таким образом, целью работы является определение характерных особенностей ударно-волнового возмущения в системе «МИП-металл», установление взаимосвязи с амплитудно-временными параметрами интенсивного ионного пучка и модифицирующим эффектом.

Залача корректном всей совокупности состоит: В описании взаимообусловленных процессов сопровождающих воздействие на материалы МИП; в определении закономерностей обуславливающих динамику фазовых особенности переходов В области энерговыделения В образования поверхностного плазменного слоя и эрозии поверхности; в определении объемную закономерностей определяющих модификацию материалов области конструкционных элементов В фазовых переходов при И распространении по объему вещества ударных и пластических волн; расчет амплитудно-временных параметров МИП.

Перечень предполагаемых подходов к решению задач включает в себя: численные методы механики сплошной среды, основанные на эйлеровом и лагранжевом формализме; методы теории переноса массы и энергии; методы статистической физики и теории вероятностей; метод статистических испытаний.

Практическая значимость работы: заключается в том, ЧТО В результате работы будут определены фундаментальные закономерности, обуславливающие модифицирующий эффект. Ещё одним решённым в ходе работы вопросом будет являться определение фундаментальной закономерности, обуславливающей параметрические критерии, которые определяют подобие воздействия МИП и КПЭ ЯТУ. Полученные критерии подобия могут быть использованы в целях имитационного моделирования радиационной стойкости материалов ядерных и термоядерных установок с применением современных ускорительных комплексов.

На начальном этапе работы предполагается адаптировать разработанные ранее пакеты программ для решения поставленных задач. В частности, в рамках кинетического подхода и использования методов молекулярной газовой

динамики описать параметры внешнего воздействия (тепловой поток и давление) на вещество импульсного потока КПЭ ЯТУ. В результате впервые будут получены пространственно–временные параметры области локального энерговыделения при воздействии на твердотельную преграду импульсного плазменного потока термоядерного диапазона энергии. В рамках численных экспериментов будут получены фундаментальные закономерности динамики ударно–волновых и плазменных процессов в объеме облучаемого вещества при внешнем воздействии энергии термоядерного диапазона как для МИП, так и для потоков КПЭ ЯТУ.

На последующих этапах работы в рамках полномасштабных численных экспериментов будет проведено детальное сравнительное исследование процессов, протекающих в системах «МИП – конструкционный материал» и «КПЭ ЯТУ – конструкционный материал». В результате будут получены общие закономерности, определяющие радиационную стойкость и модификацию свойств конструкционных материалов при мощном импульсном энергетическом воздействии различной природы. Научная новизна работы: результат, ожидаемый при выполнении проекта, заключается в установлении амплитудно-временных параметров (амплитуды импульсов ускоряющего напряжения и тока, длительность, плотность мощности и др.) МИП, обеспечивающих имитацию воздействия на вещество импульсного КПЭ ЯТУ. Эти результаты будут получены впервые и могут быть использованы при создании испытании И новых материалов, предназначенных ДЛЯ конструкционных элементов, испытывающих высокоэнергетическое воздействие.

# 1 Аналитический обзор литературных источников

#### 1.1 Ионное легирование

Методы модификации свойств конструкционных материалов на основе с различных металлов И ИХ сплавов целью улучшения контактнофизических, трибологических, радиационных, и характеристик, других получили широкое распространение. На данный момент существуют новые возможности, которые открывают методы, в основе которых лежит воздействие на конструкционные материалы потоками излучения. Это распространяется на потоки лазерного излучения, СЭП и МИП, плазмы.

Процесс имплантации ускоренных ионов в среду также называют ионным внедрением. Иногда также можно встретить термин ионно-лучевая модификация. В отношении технологий обработки ионными пучками можно встретить термин ионное легирование и ионно-лучевая модификация [11, 12]. Для данных целей чаще всего прибегают к использованию ионных пучков в диапазоне энергий 10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup> кэВ [12, 13].

Приведённый выше диапазон энергий существенно превышает энергии химического взаимодействия молекул и атомов в конденсированном веществе. Принимая во внимание вышесказанное, можно заключить, что изменение структуры топографии поверхностей И твёрдых тел, подверженных воздействию пучков ионов, происходит в таких условиях, которые далеки от термодинамического равновесия, что в свою очередь позволяет обеспечить получение новых уникальных поверхностных объёмных свойств ИЛИ материалов [2, 14-19].

Преимущества метода ионного легирования относительно других методов обработки заключаются в том в том, что он делает возможным следующее [2]:

 изменение характеристик приповерхностных слоев материала мишени вне зависимости от состояния объема;

создание твердых растворов с содержанием легирующих элементов,
 существенно большим пределов их равновесной растворимости;

сохранение неизменных размеров обрабатываемого тела (с точностью до десятков нанометров);

 осуществление ионного легирования при низких температурах – с целью избегания деградации объёма и поверхности облучаемых мишеней в результате процессов стимулированных высокой температурой;

 воспроизводство и контроль параметров процесса ионного внедрения с очень высокой точностью.

Во многих случаях стоимость модификации свойств и структуры материалов ионными пучками оказывается гораздо ниже стоимости при применении обработки традиционными способами.

Недостатками метода считается следующее:

 малая толщина модифицированного слоя, которая может составлять до нескольких средних проективных пробегов ионов в веществе (*R<sub>p</sub>*). В рассматриваемом диапазоне плотности энергии средний проективный пробег не превышает десятых долей микрона;

 отсутствие возможности обработки скрытых поверхностей вследствие прямолинейного распространения ионов, так называемое явление геометрической тени [11, 12].

Последний недостаток возможно преодолеть при использовании метода имплантации ионов из плазмы [13].

Актуальным для увеличения модифицируемой зоны вплоть до десятков микрометров является применение мощных импульсных ионных пучков наносекундной длительности [1-3].

Стоит отметить, что для некоторых технических сфер применения есть потребность увеличения глубины зоны влияния ионов на структуру и характеристики используемых материалов еще 1-2 порядка. Это увеличение зоны влияния ускоренных ионов позволит при обработке их поверхности модифицировать субмиллиметровые и даже миллиметровые слои мишеней.

Существенную роль в модификации структуры и свойств материалов будут играть вторичные процессы, например динамических эффекты, которые будут рассмотрены далее.

#### 1.1.1 Торможение в конденсированной среде ускоренных ионов

С точки зрения потерь энергии, существенными процессами будут являться упругие взаимодействия с атомами (ядрами) вещества мишени и неупругие столкновения ускоренных ионов со связанными электронами, другими словами – эффекты ионизации, а также возбуждения атомов вещества мишени [2, 11, 20].

Соответственно, были введены понятия сечений ядерного и электронного торможения  $S_{e,n}$  применяемых при описании торможения ионов в среде

$$S_{e,n} = -(1/N)(dE/dx)_{e,n},$$
 (1)

где dE / dx – потери энергии на единице пути иона;

*N* – количество атомов вещества в единичном объеме.

На рисунке 1 приведена зависимость сечений ядерного и электронного торможений от энергии. На данном рисунке значения характерных энергий  $E_1 < E_2 < E_3$  содержатся в разных пределах, которые зависят от рода и параметров иона и мишени:  $E_1 = 1 - 10^3$  кэВ,  $E_2 = 10 - 10^4$  кэВ,  $E_3 = 10^3 - 10^6$  кэВ . Теория Линдхарда-Шарфа-Шиотта (ЛШШ-теория) применима для описания торможения ионов в области энергий. Теория Бете-Блоха применяется для описания торможения ионов с более высокими энергиями. Так, при энергии, лежащей в диапазоне  $E < E_2$  превалируют ядерные потери, а в диапазоне  $E > E_2$  преобладают электронные потери [3, 21].

Согласно ЛШШ-теории, сечение электронного торможения будет описываться следующим соотношением  $S_e(E) = qE^{1/2}$ , где множитель q обуславливается атомными массами и зарядами ядер ускоренных ионов и

атомов вещества мишени. Из рисунка 1 можно проследить соотношение для ядерного торможения ионов в среде  $S_n(E)$ , которое являясь несколько сложнее, представляет собой зависимость, которая принимает максимальное значение в точке  $E_1$ .



Рисунок 1 – Характерная зависимость сечения ядерного S<sub>n</sub> и электронного S<sub>e</sub> торможений от их энергии [12]

По протяжённости вглубь вещества ионные пробеги, согласно теории Линдхарда-Шарфа-Шиотта, описываются гауссовым распределением, которое имеет вид:  $f(x) = (\sqrt{2\pi}\Delta R_p)^{-1} \exp\left[-(x-R_p)^2/(2(\Delta R_p)^2)\right]$  и характеризуются средним проективным пробегом  $R_p$  (в дальнейшем для простоты – проективным пробегом, т.е. средним расстоянием, на которое проникают в глубину плоской мишени ионы пучка, перпендикулярного ее поверхности (среднее значение проекции траектории иона на нормаль к облучаемой поверхности). Используется для характеристики глубины проникновения в вещество ионов фиксированной энергии). А также характеризуется стандартным отклонением  $\Delta R_p$ , характеризующим разброс значений пробегов.



Рисунок 2 – Внедрение ускоренных ионов в вещество: а - теоретические концентрационные профили ионов бора (В<sup>+</sup>) различной энергии при их внедрении в кремний [2]; б, в - профили концентраций (1), электронные (2) и ядерные потери (3) при внедрении ионов Ar<sup>+</sup> в чистый алюминий: E=20 кэB (б) и 40 кэB (в) [12].

Возможно заметное отклонение профилей распределения ионов в зависимости от глубины, наблюдаемых при экспериментах от расчётных для мишеней, имеющих кристаллическую решётку. Объясняется данный факт наличием явлений распыления поверхности мишени под действием облучения ионами и ионным каналированием, также в связи с протеканием радиационноусиленной диффузии [11, 12].

# 1.1.2 Значимые эффекты при облучении ускоренными ионами конденсированных сред

Можно выделить и разделить на три класса основные эффекты при воздействия ускоренных ионов на вещество [1-3, 5, 10-12, 18, 20-38]: эффекты,

протекающие в зоне пробега ионов протяжённостью в несколько средних проективных пробегов ( $R_p$ ); в зоне проникновения ионов, а также ближайшей её окрестности глубиной от 1 до 10 средних проективных пробегов; в слоях мишени глубиной, в тысячи раз превышающей средние проективные пробеги ионов.

# 1.1.2.1 Эффекты воздействия, протекающие в зоне пробега ионов протяжённостью в несколько средних проективных пробегов

Среди наиболее значимых стоит выделить следующие эффекты:

отражение малой части бомбардирующих ионов от поверхности мишени; прямое кинетическое распыление части атомов поверхностного слоя [29]; легирование поверхностного слоя, в том числе, до концентраций, существенно превышающих равновесные; образование первично выбитых атомов вещества, способных, при наличии у них достаточной энергии, выбивать другие атомы и т.д., с образованием в итоге каскадов атомных смещений; эффекты ионного каналирования и атомной фокусировки на периферии каскадов; формирование, по мере развития каскадов ионизационных пиков и пиков атомных смещений [1, 31]; термализация плотных каскадов атомных смещений с образованием разогретых до нескольких тысяч Кельвина наноразмерных областей с последующей их закалкой со скоростью  $10^{10} - 10^{15}$ К/с и, в некоторых случаях, дополнительным термическим распылением поверхности. 1.1.2.2 Эффекты воздействия в зоне проникновения ионов, а также ближайшей её окрестности глубиной от 1 до 10 средних проективных пробегов

 Миграция и аннигиляция дефектов, образование комплексов из примесных и матричных атомов и дефектов, протекание процессов внутрикаскадной и внекаскадной радиационно-усиленной диффузии;

 изменение состава поверхностного слоя по глубине мишени (например, за счет обратного эффекта Киркендала [33]);

образование скоплений дефектов, вакансионных и газонаполненных пор;

 образование локальных концентрационных неоднородностей сегрегаций, предвыделений, фаз;

– растворение фаз;

 формирование связанных с внедрением примесей высоких приповерхностных статических напряжений, способных инициировать фазовые превращения типа мартенситных в окрестности легируемой зоны [30].

# 1.1.2.3 Эффекты воздействия в слоях мишени глубиной, в тысячи раз превышающей средние проективные пробеги ионов

Поверхностный высокоскоростной нагрев при бомбардировке ионами, как следствие протекание фазовых и внутрифазовых процессов в объеме мишени. Формирование дислокаций при высоком флюенсе имплантации и перемещение этих дислокаций в объем вещества на глубину до  $L \sim 10^3 R_p$  и более [2]. Образование послекаскадных решеточных ударных волн, а также волн сжатия с напряжениями, превышающими реальный предел текучести, и их распространение в среде [6, 7, 25, 26]. Инициирование послекаскадными

ударными волнами самораспространяющихся фазовых превращений в метастабильных средах.

Стоит отдельно отметить тот факт, что с применением облучения импульсными пучками с высоким значением плотности тока ( $j > 200 A / cm^2$  [1]) возникают эффекты плавления и абляции поверхности мишени и, как следствие, невозможность легирования. При воздействии интенсивными импульсными пучками ионов возникают термоупругие волны, которые способны изменить структуру и характеристики вещества не только в зоне внедрения ионов, но и далеко за её пределами [1, 12, 13].

Рассмотренные при анализе процессы, являются лишь частью всей совокупности взаимообусловлено протекающих в мишени процессов при ионном облучении. Классификация процессов является достаточно сложной задачей, особенно, если учитывать их сочетанное протекание и влияние друг на друга.

Стоит отметить тот факт, что физика взаимодействия разного рода ионизирующих излучений с конденсированными средами, в зависимости от их вида, существенно отличается друг от друга. Вследствие этого механизмы влияния для определённого вида повреждающего излучения следует рассматривать в отдельности. Однако общим для всех ионизирующих излучений будет являться создание первичных атомов отдачи в веществе [5, 13].

После образования первичного атома отдачи, физика воздействия всех видов излучения на вещество фактически сводится к одним и тем же процессам. В зависимости от энергии каждый первичный атом отдачи образует либо единичную френкелевскую пару, как это обычно бывает при облучении электронами (E > 0,5 МэВ) и жесткими гамма-квантами, либо каскад атомных смещений (который может включать в себя целую серию плотных каскадов) [5].

Установлено, что электроны с E > 0,5 МэВ и жесткие -кванты образуют в тонких пластинках равномерно распределенные по объему френкелевские пары. Кроме того, эти виды излучения ионизуют либо возбуждают отдельные атомы [13].

Более тяжелые частицы: реакторные нейтроны, тяжелые ионы и осколки деления, наряду с ионизацией атомов вещества, способны порождать каскады атомных смещений. Тяжелые ионы в матрицах из тяжелых атомов, когда в ходе торможения пробег между двумя столкновениями становится относительно малым, образуют упомянутые выше плотные каскады атомных смещений [5].

Было доказано, что плотные каскады атомных смещений, являются зонами взрывной энергоотдачи, излучают послекаскадное ударно-волновое возмущение [5, 6, 25, 31]. Данное ударно-волновое возмущение способно оказывать сильное радиационно-динамическое влияние на вещество, а в отдельных случаях инициирует структурные и фазовые изменения на фронте УВВ. При помощи этих и подобных им эффектов возможно осуществление прорыва пучковой обработке различного рода веществ. Так, данные эффекты делают возможным: значительное увеличение глубины влияния пучков тяжёлых ионов, электронов и других на вещество среды, а также существенное снижение температуры и многократное ускорение некоторых процессов [13].

Первоначально наибольший интерес был направлен и сфокусирован на исследовании околоповерхностного слоя, толщиной соизмеримой со значением величины пробега легируемых в тело твердой фазы ионов. Средний  $R_p$  для ионов в диапазоне энергий от 10 до 100 кэВ составляет не более сотни нанометров. Во множестве статей, монографий и обзорах можно найти сведения об эмпирическом и теоретическом исследованиях процессов, взаимообусловлено протекающих в легируемом ионами слое [1-3, 10-16, 20, 21, 31-35].

1.2 Анализ эмпирических данных по изменению структуры и характеристик веществ при ионном облучении на глубине, существенно превосходящей *R*<sub>n</sub>

Имеется достаточно большое количество фактов аномально глубокого воздействия ионного облучения на структуру и свойства материалов [2, 5, 17-19, 22-24, 36-54]. Обнаруженные в указанных работах и другие подобные факты, касающиеся изменения структуры и свойств конденсированных сред в глубинных слоях, во много раз превосходящей средние проективные пробеги ионов, называются «эффектами дальнодействия» при ионной бомбардировке.

Так. ряде работ указывается на в существенное увеличение износостойкости и микротвёрдости околоповерхностных слоёв мишени протяжённостью от единиц до сотен микрометров при ионном облучении [28, 52-67]. Существуют данные, в которых говорится о модифицировании элементного и фазового составов, а также строения приповерхностных слоев веществ очень большой глубины [17-19, 38-47, 68-97], установленные различными методами. Например, открыто аномально глубокое внедрение примесей в разного рода материалы [14, 15, 38, 68-70]. Выявлена модификация фазового состава И структуры околоповерхностных слоев мишеней протяжённостью, много большей толщины слоя, который легируется [2, 5, 17-19, 22, 23, 39-47, 98]. Существующие на сегодняшний день данные представляют собой прямое доказательство наличия так называемых эффектов дальнодействия при ионной бомбардировке.

Объяснение причины эффекта дальнодействия весьма трудная задача. Были предложены разного рода механизмы. Некоторые из них считаются вполне достоверными, некоторые следует доработать и более полно обосновать с экспериментальным доказательством. Существует ряд не в полной мере изученных явлений.

Например, изучены эффекты при которых происходит увеличение глубины внедрения примесей и увеличение протяжённости зоны возникновения

радиационных дефектов в веществах с правильной кристаллической решёткой, которые связанны с особенностями уравнений движения каскадных атомов в веществах [11, 31], а кроме того эффекты, которые обусловливаются радиационно-стимулированной диффузией или трибодиффузей (процесс миграции имплантированных атомов от разогреваемой в процессе трения поверхности вглубь вещества) [13, 23]. Данные эффекты являются не в малой степени малозначительными, что было подтверждено при расчётах и экспериментах. Соответствующая этим эффектам глубина внедрения ионов не превышает 10 средних проективных пробегов ионов [13, 23, 67].

В серии трудов некоторыми авторами, с целью объяснить эффект дальнодействия, предлагается использование идеи коллективных процессов генерации и распространения упругих решеточных волн [6, 25, 26, 52-54, 60, 99-101], которые связанны с превращением пар Френкеля.

Согласно гипотезе, которая представлена в труде [7], процессы аннигиляции пар Френкеля должны иметь своим следствием «мгновенный» локальный разогрев решетки, сопровождающийся расширением разогретой области (в состав которой входит несколько десятков атомов) и генерацией упругих волн, которые способны инициировать безактивационную миграцию междоузельных атомов, и, кроме того, избирательно раскачивать все дефекты решетки, а также все атомы, выделяющиеся на фоне матрицы. Эффект «радиационной тряски» [102] нашел подтверждение в работах, посвященных численному моделированию неустойчивых френкелевских пар.

В работе [100] сделана попытка объяснить механизм усиления упругих волн в ходе их распространения в кристалле с дефектами. Было сделано предположение о том, что упругая волна, инициируя реорганизацию дефектов, порождает следующую волну. При этом поле порождаемой волны компенсирует затухание исходной. Такой эффект возможен для концентрации кластеров дефектов >10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>. Согласно мнению, высказанному в работе [38], такая значительная концентрация дефектных кластеров в процессе облучения возможна лишь в зоне пробега ионов, в которой постоянно формируются дефекты. На большей толщине, с учётом изначально высокой концентрации дефектов, после начальных импульсов упругих волн эти дефекты отжигаются, а в последующем усиления волн не происходит.

Выше уже было отмечено аномально глубокое (до нескольких десятков микрон) проникновение примесей внедрения, имеющих малый атомный радиус, которое достигается при использовании сильноточных пучков ионов низких энергий (измеряемых единицами кэВ) и высоком флюенсе облучения. Оно стимулируется разогревом мишеней и наличием дефектов и измеряется десятками микрометров [3]. Но это скорее не имплантационный, а имплантационно-диффузионный эффект.

Ни один из перечисленных механизмов не объясняют эффекты модификации структуры и свойств материалов при облучении ионами большого радиуса (в том числе ионами инертных газов), а также гораздо более глубоких приповерхностных слоев материалов (протяженностью от сотен микрон до нескольких миллиметров), включая эксперименты по кратковременному (1-2 с) облучению низким флюенсом (начиная с 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>) [8, 23, 43, 103].

До последнего времени, вряд ли бы кто-либо взялся до опыта предсказать, будут ли вообще наблюдаться эффекты дальнодействия, и в какой степени они будут проявлять себя, для тех или иных типов ионов, а также состава и состояния мишени.

В настоящее время известны два подтвержденных экспериментально механизма дальнодействия, характеризующиеся наиболее протяженной зоной воздействия [13]. Они связаны: с генерацией дислокаций в статических полях напряжений от внедряемых примесей при высоком флюенсе имплантации и перемещением этих дислокаций в объем вещества на глубину до  $L \sim 10^3 R_n$  и более (этот механизм исследован и описан в работах Диденко А.Н., Козлова Э.В., Шаркеева Ю.Н., Лигачева А.Е., Рябчикова А.И. и др. [2, 24, 57, 83-88, 91-97]) И с инициированием пучками тяжелых ускоренных ИОНОВ самораспространяющихся вглубь материала структурных И фазовых

метаморфоз в средах с квазиустойчивым равновесием с повышенной запасенной энергией (уже при низких флюенсах облучения, начиная с  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>; соответствующее время облучения может измеряться несколькими секундами) на глубине до  $L \sim 10^4 - 10^5 R_p$ . Эти быстропротекающие процессы были обнаружены в Институте электрофизики УрО РАН [17, 18, 22, 39, 40].

В последнем случае регистрируемые эффекты связаны с уже упоминавшимся радиационно-динамическим воздействием пучков ионов на конденсированные среды, которое связано с распространением послекаскадных ударных волн, рождающихся в ходе эволюции плотных каскадов атомных смещений. Роль этих эффектов в воздействии на строение и свойства материалов является не просто существенной, но и во многих случаях решающей. В связи с этим рассмотрим их природу более подробно.

# 1.3 Радиационно-динамическое воздействие на вещество пучков заряженных частиц

«Эффект малых доз», состоящий в существенном воздействии ионизирующих излучений на структуру и свойства материалов при крайне незначительном числе смещений на атом [104, 105], а также «эффекты дальнодействия» при облучении конденсированных сред заряженными частицами массой, равной или превышающей массу протона [15, 38], не получили убедительного объяснения, на основе классических представлений.

Очевидно также, что попытки объяснения этих явлений исключительно на основе анализа процессов образования при облучении пар Френкеля, дислокаций и других типов дефектов не являются основательными, так как масштабы дальнодействия во многих случаях многократно превышают размеры отдельных кристаллитов (зерен) в поликристаллах, в то время как границы последних являются стоками либо препятствиями для структурных дефектов.

Основная масса предложенных моделей (механизмов) дальнодействия не принимает во внимание специфику отклика подвергаемой воздействию

среды, однако, в последнее время установлено, что такой отклик может иметь решающее значение.

Анализ различных аспектов воздействия ионизирующих излучений на вещество [5], в связи с отмеченными проблемами, свидетельствует об особой роли радиационно-динамической составляющей воздействия ионизирующих излучений на метастабильные среды.

Картина распределения радиационных дефектов, производимых в результате облучения материалов частицами, масса которых превышает массу электрона (такими частицами являются реакторные нейтроны, осколки деления и ускоренные ионы с энергиями от  $10^3$ - $10^4$  до  $10^7$ - $10^8$  эВ), не представляет собой совокупность однородно распределенных в объеме вещества пар Френкеля (рисунок 3 а), а является, согласно [33, 106], абсолютно иной (рисунок 3 б-в, 4).

Хорошо известно, что реакторные нейтроны создают первично выбитые из узлов решетки атомы отдачи, способные смещать в свою очередь другие атомы и т. д. В итоге, первично выбитый атом порождает один или несколько плотных неразветвленных каскадов атомных смещений (рисунок 3 б). Такие каскады включают в себя от нескольких сотен, до нескольких десятков тысяч атомов вещества. По мере развития каскада каждый из атомов многократно изменяет свою кинетическую энергию, сталкиваясь с соседними атомами, до момента образования «термического пика».



Рисунок 3 – Характер радиационных повреждений при корпускулярном облучении: (a) электроны (единичные пары Френкеля), (б) нейтроны (зоны прохождения плотных каскадов атомных смещений - «обедненные зоны»), (в) тяжелые ионы и осколки деления (области ионизации, области плотных каскадов). На схеме (в), выполненной без учета масштаба, выделены случаи облучения ионами высоких, средних и низких энергий: ВЭ, СЭ и НЭ [5].

Относительно малая доля взаимодействий, сопровождающаяся возбуждением ядер и ядерными реакциями, не играет существенной роли для дальнейшего анализа.

Торможение осколков деления, а также ускоренных ионов и быстрых атомов отдачи в конденсированных средах обусловлено не только упругими столкновениями с атомами вещества, но и неупругой передачей энергии электронной подсистеме, затрачиваемой на возбуждение и ионизацию атомов (неупругие потери).

По мере торможения осколков деления и высокоэнергетических ионов неупругие потери уменьшаются, а сечение упругих взаимодействий возрастает, при этом все чаще образуются первичные атомы отдачи (с наиболее вероятной энергией в диапазоне 10<sup>4</sup>-10<sup>6</sup> кэВ). Каждый из таких атомов образует один либо несколько плотных каскадов атомных смещений, как и в случае облучения реакторными нейтронами (рисунок 3 в).

В случае ионов низких и средних энергий (1-100 кэВ [2]) потери на упругие и неупругие столкновения сопоставимы по величине и локализуются,

главным образом, в объеме плотных каскадов атомных смещений. Соотношение доли упругих и неупругих потерь в плотном каскаде представлено в работах [2, 3, 5]. Вклад других возможных механизмов торможения для рассматриваемого нами диапазона энергий заряженных частиц либо пренебрежимо мал, либо полностью отсутствует.



Рисунок 4 – Схема «обедненной зоны», образующейся после прохождения каскада атомных смещений [16].

# 1.3.1 Формирование послекаскадных ударных волн в ходе эволюции плотных каскадов атомных столкновений

Эволюция каскада атомных столкновений (смещений), приводящая в итоге к его термализации занимает время порядка 10<sup>-12</sup> с [32]. Для сопоставления, характерные времена химического и ядерного взрыва составляют, приблизительно 10<sup>-5</sup> и 10<sup>-8</sup> с, соответственно [5].

Упрощённая форма каскадной области для ионного пучка одинаковой энергии, падающего нормально на поверхность плоской мишени, в условиях отсутствия каналирования представляет собой эллипсоид вращения [1, 4] (смотрите рисунок 5). В целях проведения оценок для не слишком легких ионов  $(M \ge 10 \text{ а.е.м.})$  допустимо использование эффективного радиуса  $R_0$  каскада. Типичное значение  $R_0$  для плотного каскада, порожденного ионом или атомом отдачи с энергией E > 10 кэВ, составляет от 5 до 10 нанометров.



Рисунок 5 – Эмиттация наноударной волны плотным каскадом атомных столкновений (х и у - продольная и поперечная координаты) [5].

Важным, с точки зрения оценки величины радиационно-динамического вклада в воздействие, оказываемое ускоренными ионами на вещество, является то, что даже в случае металлов время, требуемое для отвода тепла из области каскада указанных размеров достаточно велико (не менее 10<sup>-11</sup> с [33]). Это время на порядок превышает время термализации каскада.

Предельное значение температуры каскадной области может быть оценено как отношение E/N энергии первичного атома отдачи (либо ускоренного иона) к числу атомов вещества в термализованном каскаде, что хорошо согласуется с оценками, полученными методом Монте-Карло [4, 31] и экспериментальными данными [4, 29: с. 90, 106]. Для тяжелых ионов эта температура может достигать от 5000-6000 К и выше. Неожиданно, что она растет с уменьшением энергии первичного атома отдачи (или ускоренного иона). Последнее определяется соотношением скорости роста энергии иона и соответствующего объема каскада (согласно [107] E/N снижается с ростом N). Очевидно, что в области каскада, в силу его малости, реализуется лишь квазиравновесное состояние, которое становится все более неравновесным по мере уменьшения энергии первичного атома и размеров каскада.

Оценки показывают, что скорость высвобождения энергии в плотных каскадах сравнима со скоростью выделения энергии в ходе ядерного взрыва

(температура ядерной плазмы  $\sim 10^8$  K), в то время как удельное энерговыделение более чем в  $10^4$  раз ниже [5].

Верхний предел давления в каскадной области может быть оценен как  $p = \frac{E}{V} (C_p / C_V - 1)$  [1, 5, 45], и достигает, нескольких единиц или даже десятков

ГПа. Вследствие резкого расширения сильно разогретой каскадной области может возникнуть почти сферическая (в случае не слишком легких ионов) ударная волна (рисунок б).

Благодаря наличию механизмов фокусировки по выделенным направлениям кристалла [5, 26, 108, 109], исходно сферическая волна может выродиться во фрагменты плоских волн (рисунок 7).



Рисунок 6 – Результаты моделирования термического пика (thermal spike) методом молекулярной динамики [26].



Рисунок 7 – Схема (а), иллюстрирующая формирование фрагментов плоских волн из исходной сферической волны, вследствие действия механизмов фокусировки [108]; и развитие плотного каскада: Си→Си (б) (моделирование на суперкомпьютере [109])

Наиболее вероятное значение энергия первичных атомов отдачи для реакторных нейтронов и тяжелых заряженных частиц составляет несколько десятков или сотен килоэлектронвольт. В таком случае атомы отдачи порождают на длине их пробега (в пределах ~ 1 мкм) один или несколько плотных каскадов атомных столкновений. Это означает, что формирование наноразмерных зон взрывной энергоотдачи с генерацией наноразмерного УВВ, которое выступает в роли общего явления для всех видов корпускулярного излучения (исключение составляют легкие частицы массой меньшей массы нуклона).

Последнее относится и к процессам самооблучения расщепляющихся материалов (рисунок 8) [110], сопровождающихся их старением.



Рисунок 8 – Образование плотного каскада осколком деления в плутонии [110].

Следует отметить, что взрывному энерговыделению с эмиттацией уединенных ударных волн до сих пор фактически не придаётся никакого значения при исследовании конденсированных сред, в том числе сред с высокой запасенной энергией в условиях облучения.
1.4 Краткий обзор данных по воздействию ионной бомбардировки на структуру и характеристики алюминия

1.4.1 Модификация структуры и свойств алюминия и его сплавов мощными импульсными и высокоэнергетическими пучками ионов

В ряде работ [139], для модификации свойств алюминия и его сплавов использованы мощные ионные пучки (МИП) (подразумеваются импульсные МИП с длительностью  $\tau < 10^{-7} c$  при плотности мощности до  $10^7 \, \text{Bt/cm}^2$ . Физические аспекты воздействия данных пучков значительно разнятся от простой ионной имплантации с применением непрерывных ионных пучков. Главное различие состоит в высокоскоростном нагреве (за время импульса) поверхностного слоя малой протяжённости (около одного  $R_p$ ) вплоть до момента полного его испарения. Одновременно с этим, при высокоскоростном нагреве поверхности мишени и испарении поверхностного слоя генерируется термоупругая волна, способная модифицирующе воздействовать на глубинные слои вещества. Как следствие вышесказанного МИП причисляются к КПЭ, что позволило несколько увеличить протяженность слоев модифицируемых при воздействии пучков ионов. В работе [133] показано, что при воздействии одиночными импульсами протон-углеродного пучка, содержащего 70% ионов углерода и 30% протонов, (с ускоряющим напряжением U = 300 кэВ, продолжительностью  $\tau_0 = 50$  нс и плотностью тока j < 150 A/ см<sup>2</sup>) на отожженные образцы сплава Д16АТ системы А1-Си-Мg происходит увеличение микротвердости приповерхностного слоя этих образцов толщиной ~ 12 мкм.

Накоплензначительный экспериментальный материал, относящийся К модификации свойств промышленных марок алюминиевых сплавов С применением высокоэнергетической ионной имплантации (ВЭИИ, E>10 M<sub>3</sub>B) [134-138]. Как уже выше отмечалось, использование высокоэнергетической ионной имплантации обеспечивает увеличение глубины модифицируемого слоя до нескольких десятков микрон. Заметно улучшаются

прочностные, трибологические и коррозионные свойства приповерхностных слоев материалов [135]. Однако, как уже отмечалось, применение ВЭИИ для решения большинства задач технически сложно и экономически неоправданно. Тем не менее, эти данные о воздействии ВЭИИ на структуру и свойства материалов необходимы для сопоставления с другими развиваемыми методами ионно-лучевой модификации материалов, в частности, с методами, предложенными в пятой главе данной работы.

Высокоэнергетическая ионная имплантация характеризуется высоким энерговыделением В электронную подсистему, вследствие чего В полупроводниках происходит «мгновенный» И диэлектриках разогрев объемов облучаемых материалов вблизи микроскопических треков сопровождающийся высокоэнергетических ионов, вплоть ДО последующей сверхбыстрой закалкой, что в свою очередь приводит к протеканию фазовых изменений, формированию дефектов, а также других процессов [136, 137]. В низкодефектных металлах энергия, выделяемая в электронную подсистему, уносится электронами из области трека вследствие большой длины свободного пробега электронов, что исключает интенсивный разогрев материала. Только в металлах с высоким количеством дефектов и, вследствие этого, малой длиной свободного пробега электронов происходит разогрев области трека [5].

Структурно-фазовые превращения и соответствующие изменения прочностных характеристик дисперсионно-твердеющих сплавов Д16 и АК4 на основе алюминия, а также термически неупрочняемого сплава АМг2 в результате внедрения невысоким флюенсом (10<sup>15</sup> и 2,5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>) ионов неона с 26.7 энергией МэВ при температурах, незначительно превышающих комнатную, изучались в работе [135]. Показано, что на начальных стадиях облучения микротвердость вышеуказанных сплавов снижается вследствие формирования блочной структуры (Д16, АМг2) и рекристаллизационных процессов (АК4-1), инициированных облучением. С повышением флюенса облучения имеет место упрочнение сплавов, обусловленное мелкодисперсными

выделениями  $\theta$ - и  $\sigma$ - фаз (Д16, АК4-1) и увеличением угла разориентировки кристаллических блоков. Как отмечалось выше, в работах [134-138] сообщается о модификации структуры слоёв материалов находящихся на глубине около сотен нанометров, что сравнимо со значением величины пробега ионов.

Авторами работы [134] установлено, что при воздействии на сплав АМг системы Al-Mn ионов неона с энергией 26,7 МэВ флюенсом  $10^{15}$  и 2,5· $10^{15}$  см<sup>-2</sup> (T = 330 K) в нем происходит увеличение угла разориентировки субзерен вплоть до образования мелкозернистой структуры в результате действия возникающих в поверхностных слоях напряжений, вызывающих скольжение дислокаций. Размеры и количество включений второй фазы A1<sub>6</sub>Mn в ходе облучения остаются неизменными.

В работе [136] показано, что характер изменения свойств дисперсионнотвердеющего сплава системы A1-Cu-Mg (Д16) под воздействием ускоренных ионов криптона с энергией 245 МэВ в значительной степени определяется исходным структурно-фазовым состоянием сплава (закаленное, искусственно или естественно состаренное).

В работах [137, 138] выполнено исследование воздействия малым флюенсом (~10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>) ионов криптона (Е=245 МэВ) при комнатной температуре на величину микротвердости дисперсионно твердеющих сплавов Д16 и А1-4 мас.% Си в различном структурно-фазовом состоянии.

Установлено, что микротвердость сплава Д16, в структуре которого содержатся зоны ГП, после облучения изменяется немонотонно. После облучения флюенсом  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> значение микротвердости уменьшается, что обусловлено стимулированными ионной бомбардировкой процессами растворения зон ГП вследствие замещающих столкновений. Последующее повышение микротвердости при флюенсе  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> связано с радиационностимулированными процессами старения, обусловливающими к образованию новых зон ГП (или высокодисперсных включений промежуточных фаз). Микротвердость этого сплава, в структуре которого присутствуют выделения упрочняющих фаз, в ходе облучения монотонно увеличивается, что связано с частичным растворением исходных включений, а также с увеличением их дисперсности, что приводит к росту микронапряжений в кристаллической решетке сплава.

Подобные результаты получены в результате исследования модельного сплава A1-4 мас.% Cu [138]. В результате облучения микротвердость искусственно состаренного сплава A1-4 мас.% Cu, в структуре которого присутствуют крупные включения  $\theta$ -фазы размером около 4 мкм монотонного увеличивается. Это может быть объяснено тем, что в ходе облучения имеет место частичное радиационно-стимулированное растворение включений  $\theta$ фазы в каскадах атомных смещений. Пересыщение вследствие этого твердого раствора атомами меди способствует протеканию процессов старения, приводящих к образованию мелкодисперсных упрочняющих фаз.

Отметим следующее. Наблюдаемые в [134-136] структурные и фазовые изменения наблюдаются на глубине, соизмеримой с длиной проективного пробега высокоэнергетических ионов (~ 12 мкм).

Увеличение твердости сплавов Al-Cu-Mg и Al-Mg-Si при их облучении различными ионами (A1<sup>+</sup> с E=5,4 MэB, Fe<sup>+</sup> с E=7,3 MэB, I<sup>+</sup> с E=10 MэB, Au<sup>+</sup> с E=16 MэB) и различными флюенсами при комнатной температуре наблюдали в работах [139, 140]. Полученные значения твердости и микроструктура сплавов сравнимы с результатами, полученными при длительном термическом старении. Так, например, при облучении ионами I<sup>+</sup> с E=10 MэB в течение 3,5 часов результаты сопоставимы с полученными после 4 дней старения при T=423 K [139].

Трансформацию структуры и свойств сплавов на основе алюминия в результате высокоэнергетического облучения авторы работ [134-138] непосредственно связывают с электронным торможением ионов высоких энергий, которое обусловливает наибольший вклад в формирование и развитие радиационных дефектов, повышенная концентрация которых активирует диффузионные процессы переползания дислокаций и выделения упрочняющих фаз.

## 2 Взаимодействие мощных ионных пучков с металлическими поглотителями

Пучково-плазменные методы создания материалов с заданными свойствами в настоящее время являются наиболее перспективными И эффективными получившими методами, широкое применение В промышленных технологиях. Широкое распространение данных методов для решения практических задач радиационного материаловедения по обеспечению материалами и удовлетворению нужд ядерной энергетики, аэрокосмической промышленности, машиностроения, микроэлектроники [142, 143] и при решении различных технологических задач в других отраслях объясняется их универсальностью. Универсальность и ценность данных методов заключается в том что, имеется ряд отличий от других способов изменения свойств материалов, например: закалки, отжига, дисперсионного твердения. Главное отличие состоит в том, что взаимодействие концентрированного потока энергии (КПЭ) с материалами одновременно включает в себя тепловое, механическое и радиационное воздействие. Таким образом, при обработке поверхности металлов мощными ионными пучками (МИП) добиваются улучшения твердости, износо- и коррозионной стойкости, усталостной прочности при длительных циклических нагрузках, эрозионной стойкости а также ряда других прочностных И эксплуатационных характеристик. Улучшение этих характеристик значительно повышает надёжность и ресурс работы изделий [144].

В современной физике импульсных пучков заряженных частиц (ИПЗЧ) накоплен значительный материал и огромный объём данных. Многие данные уже были структурированы, но материал, который накоплен за последние несколько лет, ещё требуется осмыслить, структурировать, обобщить и представить как совокупность знаний об системе «МИП – металл». Таким образом, существует необходимость проведения анализа и обобщения некоторых данных, результатов экспериментов и исследований в области

модификации металлов и сплавов с применением МИП, физике ударных волн и плазмы, на основе изучения разрозненных публицистических материалов, наиболее ярко отражающих закономерности развития физических процессов, протекающих в системе «МИП – металл».

Рассматривая такое направление физики твёрдого тела и радиационного материаловедения, как воздействие КПЭ, а в частности, МИП на металлы, можно прийти к следующему. МИП являются удобным инструментом для проведения экспериментов, фундаментальных исследований во многих направлениях. С точки зрения прогнозирования свойств поверхностных слоев облучаемых материалов, исследование результатов облучения в зависимости от параметров МИП является актуальной задачей. В натурном эксперименте не всегда удается определить причинно-следственные связи между процессами взаимообусловлено протекающими в системе «МИП-металл». Математическое моделирование является мощным инструментом, позволяющим в непрерывном режиме рассматривать всю совокупность протекающих процессов.

#### 2.1 Описание системы «МИП-металл»

Вся совокупность взаимообусловлено протекающих физических процессов протекающих в системе «МИП-металл» определяет возможность принятия того или иного технологического решения. Новая структура металла, которая создаётся в объёме металлического поглотителя при воздействии на него концентрированного потока энергии (КПЭ), а в частности МИП, обуславливает изменение физико-механических свойств мишени. Данные изменения могут реализовываться посредством различных методов, таких как: генерация дефектов в кристаллической решётке (дислокаций), а также эволюция ансамбля дислокаций в результате имплантации в металл ионов другого сорта; осаждения тонких плёнок на поверхность подложки, которое осуществляется как прямым ионным облучением, так и осаждением пучковой плазмы; формирование модифицированных поверхностных и глубинных слоёв

металла при высокоскоростной закалке и релаксации сформированного МИП температурного поля; перераспределение плотности дислокаций и изменения во фронте пластической части упруго-пластического импульса и прочее. Реализация того или иного процесса на прямую зависит от энергии используемых ионов, лежащей в диапазоне от десятков кэВ до десятков МэВ, в широком диапазоне варьирования плотности ионного тока, который составляет от нескольких мА/см<sup>2</sup> до десятков и даже сотен кА/см<sup>2</sup>, а также длительности облучения от десятков наносекунд до условно непрерывного. Уровень мощности подводимой энергии, другими словами интенсивность, принята в качестве параметра, который определяет модифицирующий эффект при преобразовании внесённой энергии (рисунок 9) [145].

Отжиг, ионная имплантация, очистка и полировка поверхности – это те технологические процессы, которые реализуются В области низких энергетических воздействий порядка 10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>. При помощи этих процессов приповерхностного без идёт модификация металла слоя изменения геометрических размеров и объёмных свойств, а также физико-механических свойств глубинных слоёв.



Рисунок 9 - Схема применения МИП в технологиях [1]

Модельное описание параметров металлов, при облучении мощным импульсным ИОННЫМ пучком, проводилось с использованием гидродинамических кодов, посредством которых реализуется обобщенная упруго-пластической [146]. Для модель среды описания поведения материального континуума в основу модели положен Лагранжев формализм. Элементы модели подробно описаны в работе [147].

Рассмотрим закономерности формирования ударно-волнового возмущения, генерируемого в результате взаимодействия МИП [147] (протонный пучок) плотностью мощности  $1,1\cdot10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность пучка  $\tau = 120$  нс) с металлической мишенью. Амплитудно-временная развертка импульсов ускоряющего напряжения и плотности тока представлена на рисунке 10. В качестве мишени рассмотрен алюминиевый поглотитель.



Рисунок 10 – Амплитудно-временная развёртка импульса ускоряющего напряжения и плотности ионного тока на выходе из узла генерации [148].

Источником ионов в диодах является плазма, генерируемая тем или иным методом на поверхности анода. В основном используются пассивные источники плазмы взрывоэмиссионного типа, представляющие собой мозаично–диэлектрическое покрытие анода в виде отдельных элементов, канавок, заполненных диэлектриком, системы отверстий, игл в диэлектрике и т.д. [149]. Например, для получения протонных пучков используют: полиэтилен (CH2), полистирол (CH), эпоксидный компаунд (C<sub>8</sub>H<sub>11</sub>O).

Рисунок 11 иллюстрирует поле удельного энерговклада, формирующегося при воздействии однокомпонентного (протонного) пучка на металлическую мишень.



Рисунок 11 – Поле удельной поглощенной за длительность пучка энергии от протонного пучка ускорителя BEPA

При описании термодинамических функций в широком диапазоне фазовой диаграммы необходимо учитывать наличие сил межатомного взаимодействия и их преодоление при расширении вещества, что в значительной степени определяет закономерности фазовых превращений. Поэтому гидростатическое давление часто делят на две части: упругую составляющую  $p_s$ , связанную исключительно с межатомным взаимодействием, зависящим от расстояния между атомами и тепловую составляющую  $p_T$ . В свою очередь, тепловую составляющую будем разделять на слагаемые, соответствующие тепловому движению ионов  $p_i$  и тепловому возбуждению электронов  $p_e$  [150],

$$p(\rho,T) = p_S(\rho) + p_T(\rho,T) = p_S(\rho) + p_i(\rho,T) + p_e(\rho,T)$$
(2)

Соответственно, внутренняя энергия также является суммой тепловой и упругой компонент,

$$\varepsilon(\rho,T) = \varepsilon_s(\rho) + \varepsilon_T(\rho,T) = \varepsilon_s(\rho) + \varepsilon_i(\rho,T) + \varepsilon_e(\rho,T), \qquad (3)$$

Функциональные зависимости составляющих давления и соответствующих составляющих внутренней энергии от плотности и температуры определяются выбором уравнения состояния (УС).

Уравнение состояния:

$$p = p(\rho, E), \tag{4}$$

## 2.2 Результаты и обсуждения

Исследована динамика физических полей и характеристик алюминиевого поглотителя в диапазоне параметров пучка j=100–3000 A/см<sup>2</sup> и U=100–3000 кэВ с шагом в 100 единиц.

На рисунке 12 представлены зависимости соответственно максимумов и минимумов полного давления.



Рисунок 12 – Поверхности полного максимального (слева) и минимального (справа) давлений при заданных параметрах пучка j =100–3000 A/см<sup>2</sup> и U =100–3000 кэВ.

На рисунке 15 представлены области параметров ионного пучка при которых реализуются различные механизмы формирования ударно-волнового возмущения.

Область 1. Основной механизм формирования импульсов механической нагрузки – термоупругость. Формирующееся возмущение является биполярным. В первом полупериоде импульса реализуется сжатие, во втором полупериоде – разрежение. Амплитуда импульсов в данной области не превышает пределов упругости. Таким образом, импульсы механических напряжений, сформированные при термоупругом механизме генерации к существенным модификациям поверхностных слоев не приводят, а изменение свойств металлов определяется процессами высокоскоростной закалки при релаксации сформированного МИП температурного поля.

На рисунке 13 представлено качественное сравнение результатов экспериментов проведённых на ускорителе ТЕМП-6 (слева) и на ускорителе ВЕРА (справа).

В работе [151], было проведено исследование, цель которого ставилась следующим образом: охарактеризовать процессы генерации волны напряжения, распространения и диссипации в металлической мишени, для изучения влияния эффекта динамических процессов на модификацию металлических мишеней на большой глубине при облучении высоко интенсивным импульсным пучком ионов. С целью изучения динамических явлений в течение обработки высоко интенсивным импульсным ионным пучком был использован метод. основанный на использовании пьезоэлектрического преобразователя на основе титаната свинца–циркония (PZT), чтобы охарактеризовать волны напряжения в облученных мишенях [152].

Эксперимент проводился на ускорителе ТЕМП-6 при комнатной температуре в условиях вакуума до  $10^{-2}$  Па. Основные параметры ионного пучка в эксперименте следующие. Пиковое ускоряющее напряжение 350 кВ и ионная плотность тока в диапазоне от 200 до 400 А/см2 при полной длительности импульса 150 нс, который соответствует плотности мощности пучка  $10^7$ – $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Волны напряжения в мишени при облучении были записаны с использованием пьезоэлектрического преобразователя Образцы титана (99,6% чистоты) с квадратным размером  $18 \times 18$  мм<sup>2</sup> и толщиной от 0,3

до 3 мм были приготовлены и отполированы с обеих сторон. Сигналы волн напряжений были записаны с помощью осциллографа TEKTRONIX TDS3052 с цифровым люминофором и временным разрешением 2 нс.

Основываясь на результатах эксперимента, которые согласуются с полученными на ускорителе BEPA, были сформулированы основные выводы:

Величина волн напряжения зависит от интенсивности облучения, при медленном увеличении ниже 300 A/cm<sup>2</sup> и гораздо выше 300 A/cm<sup>2</sup>. Тепловой удар из-за сверхбыстрого нагрева и охлаждения является основным процессом в нижней интенсивности облучения, в то время как давление абляции играет более важную роль на более высокой интенсивности.

Скорость распространения волн напряжения, измеренных, была увеличена вместе с увеличением интенсивности облучения, от примерно 5900 м/с при 200 А/см<sup>2</sup> и до 6300 м/с при 400 А/см<sup>2</sup>. Повышение в скорости распространения может быть признаком генерации ударных волн.

Измеренная волна напряжения имеет более низкую интенсивность по сравнению с пределом текучести титана и его сплавов. Этот факт указывает на быстрое ослабление волны напряжения во время распространения внутри, как пластической деформации и формировании дефектов, происходящих в материале мишени, что и объясняет эффективной модификации поверхности металлов при облучении МИП.



Рисунок 13 – Волны напряжений для титановых мишеней толщиной 3 мм, облученной при различных плотностях токов ионов 200-400 А/см<sup>2</sup>, соответственно (слева). Волны напряжения для алюминиевой мишени при воздействии МИП в момент окончания импульса тока (t20 нс).

Область 2. Реализуется абляционный механизм генерации. Формирующееся возмущение однополярное (Рисунок 14).



Рисунок 14 – Импульс механических возмущений, возбуждаемых МИП в алюминии к моменту окончания импульса тока

Максимальная амплитуда формирующегося импульса механической нагрузки на момент окончания импульса ионного тока превышает динамический предел текучести алюминия ( $\sigma_{max} > \sigma_g = 2 \cdot 10^{10}$  дин/см<sup>2</sup>). В данной области возможно формирование модифицированных слоев материала за пределами области воздействия пучка (глубинное упрочнение), которое обусловлено перераспределением плотности дислокаций и изменениями во фронте пластической части упруго-пластического импульса.

При постепенном увеличении параметров воздействия (j, U) в данной области линии равной амплитуды формируемых возмущений стремятся к энерговклада. Амплитуда формирующегося линиям равного упругопластического не чувствительна к конкретным значениям плотности ионного определяется тока ИЛИ энергии ионов И только значением полного Наблюдается энерговклада. постепенное уменьшение скорости роста параметров импульса последовательном увеличении амплитудных при параметров пучка.

Область 3. Реализуется абляционный механизм генерации. Профиль формирующегося импульса механической нагрузки является биполярным. В

фазе разряжения амплитуда импульса по модулю превышает предел текучести. Данный факт обуславливает возможность реализации откольных механизмов разрушения на облучаемой поверхности. Формируется откольный слой материала, с достаточно высоко плотностью двигающийся навстречу пучку.



Рисунок 15 – Контурный график полного давления при заданных параметрах пучка j =100 –3000 A/см<sup>2</sup> и U =100–3000 кэВ.

Наличие или отсутствие биполярной структуры В импульсе механических напряжений определяет также возможность протекания откольных явлений на тыльной поверхности поглотителя. При выходе биполярного импульса (сжатие – разряжение) на тыльную поверхность интерферренция встречных происходит волн разряжения. Суммарная амплитуда импульса при этом может превысить предел текучести, что приведет к отслаиванию слоев материала на тыльной поверхности.

# 2.3 Динамика формирования импульса механических возмущений в металлической мишени при воздействии протонно-углеродного пучка

На рисунке 16 (а-г) представлена динамика максимальных амплитудных

параметров ударно-волнового возмущения на этапе взаимодействия МИП с металлом в зависимости от плотности ионного тока. Рассмотрены два случая: компонентный состав пучка представлен только протонной компонентой рисунок 16 (*a*, *в*); двухкомпонентный МИП: 60% - протоны, 40% - ионы углерода рисунок 16 (*б*, *г*).

В топографии полей  $-\sigma_{max}(t)$  можно выделить характерные области. Для однокомпонентного протонного пучка их две: область (1), в которой формирование механических напряжений обусловлено импульса термоупругими процессами, и область (2) в которой генерация импульса происходит посредством отдачи от газоплазменной подсистемы. Постепенное увеличение плотности тока И удельного энерговклада обуславливает уменьшение времени перехода между различными механизмами формирования импульса механической нагрузки. Наличие в пучке углеродной компоненты определяет присутствие на профиле поля  $-\sigma_{\max}(t)$  области, в которой происходит формирование импульса отдачи от плазмы, сформированной диссипацией энергии углеродной компоненты пучка (область 3).

При постепенном увеличении плотности ионного тока, наблюдается переходный режим между механизмами формирования ударно-волнового возмущения. Параметры данного переходного режима зависят как от материала поглотителя, так и от компонентного состава МИП. С одной стороны наличие углеродной компоненты приводит к общей тенденции снижения плотности тока, необходимой для осуществления перехода от термоупругого механизма нагружения к абляционному. Так для алюминия она уменьшается с 500 до 300 A/см<sup>2</sup>. Для меди с 400 до 200 A/см<sup>2</sup>.

С другой стороны, в диапазоне плотностей тока, при которых взрывной механизм нагружения становится превалирующим, различие компонентного состава определяет количественное изменение амплитудных параметров импульса механических возмущений как в алюминиевом, так и в медном поглотителях. Наличие углеродной компоненты в составе пучка (в количестве







а) протонный пучок; б) МИП: 60 % - протоны, 40 % - ионы углерода.

Ha рисунке 17 (*a*, б) представлены зависимости амплитудных параметров импульсов механической нагрузки от плотности ионного тока, генерируемых при воздействии МИП различного компонентного состава (а – протонный; б – протонно-углеродный МИП) на мишени из меди и алюминия. представленных зависимостей Анализ позволяет однозначно выделить механизмы формирования ударно-волнового возмущения ПО значениям плотности ионного тока. На участках термоударного и переходного режимов генерации зависимость амплитуды от значений плотности тока носит линейный Наличие двух линейных участков в зависимости характер.  $-\sigma_{\max}(j)$ С

различными углами наклона, является экспериментально установленным фактом. При дальнейшем увеличении плотности ионного тока зависимость максимальной амплитуды в импульсах механической нагрузки становится нелинейной. Данный факт обусловлен процессами экранировки частиц пучка разлетающимся с облучаемой поверхности газоплазменным факелом.



Рисунок 17 – Зависимости амплитудных параметров импульсов механической нагрузки от плотности ионного тока, генерируемых при воздействии МИП различного компонентного состава (*a* – протонный; *б* – протонно-углеродный МИП) на мишени из меди и алюминия.

Рисунок 18 иллюстрирует влияние компонентного состава МИП на амплитудные параметры импульса механических напряжений в алюминиевой мишени при различных плотностях тока пучка. В диапазоне плотностей тока  $500-600 \text{ A/cm}^2$  связь амплитудных параметров импульсов сжатия с долей протонной компоненты в пучке линейна. Отклонение в обе стороны от указанного диапазона приводит к формированию нелинейных участков на рассматриваемой зависимости. При *j* < 500 A/cm<sup>2</sup>, участок 65–100% (по

протонной компоненте) характеризуется переходом от абляционного к термоударному механизму генерации механического возмущения. Дальнейшее увеличение концентрации тяжелой компоненты приводит к увеличению амплитуды генерируемых возмущений. Увеличение плотности тока ведет к росту вклада абляционного механизма генерации, и как следствие к тому, что увеличение доли протонной компоненты до 100%, обуславливает большие достигаемые значения амплитуды импульса механической нагрузки.



Рисунок 18 – Зависимость максимальной амплитуды импульса механических возмущений в алюминиевой мишени от компонентного состава МИП

Таким образом, при формировании ударно-волнового возмущения, обусловленного мощным локальным энерговыделением от МИП в веществе, наблюдается существенное влияние компонентного состава МИП. Компонентный состав определяет как амплитудные параметры генерируемых волн нагрузки в веществе, так и реализацию различных механизмов нагружения. Наблюдаемые амплитудные значения импульсов механических напряжений, реализующиеся посредством термоупругого механизма генерации не превосходят динамических пределов текучести рассмотренных металлов. Следовательно, термоупруго сформированные механические напряжения не могут приводить к существенным изменениям реологических свойств поверхностных слоев. В данном случае известные механизмы модификации металлов определяются главным образом процессами высокоскоростной закалки при релаксации сформированного МИП температурного поля и усилением миграции дефектов и дислокаций в волне теплопроводности.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настояшее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью продукта разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного коммерциализации его результатов. исследования И Это важно ДЛЯ разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

– разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;

организация работ по научно-исследовательскому проекту;

определение возможных альтернатив проведения научных исследований;

– планирование научно-исследовательских работ;

 оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой,
 бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В рамках данной работы проведены численные эксперименты и проведено сравнительное исследование процессов, протекающих в системах «мощный ионный пучок – конструкционный материал» и «концентрированный поток энергии ядерных и термоядерных установок – конструкционный материал» (в качестве конструкционного материала на первоначальном этапе работ рассматривается конструкционный алюминий).

#### 3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В результате выполненной работы получены общие закономерности, стойкость определяющие радиационную И модификацию свойств конструкционных материалов при мощном импульсном энергетическом В воздействии различной природы. результате работы определены обуславливающие фундаментальные закономерности, параметрические критерии, которые определяют подобие воздействия МИП и КПЭ ЯТУ. Полученные подобия могут быть критерии использованы В целях имитационного моделирования радиационной стойкости материалов ядерных и термоядерных установок с применением современных ускорительных комплексов.

Практический результат при выполнении проекта, заключается в установлении амплитудно–временных параметров (амплитуды импульсов ускоряющего напряжения и тока, длительность, плотность мощности и др.)

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные научные отрасли.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данных расчетов. Результаты сегментирования представлены на рисунке 19.

		Выравнивание энерговыделения в кипящих реакторах							
		Атомная промышленность Научная отрасль							
HOCTb	Сильная								
Потреб	Слабая								

Рисунок 19 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию проведенных расчетов

### 3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценивать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть методы моделирования взаимодействия импульсных пучков заряженных частиц с веществом с помощью персонального компьютера (далее ПК), а именно построение математической модели на базе гидродинамических кодов.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \,, \tag{5}$$

где

K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

 $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

 $E_i - 6$ алл *i*-го показателя.

	_	Б	баллі	Ы	Конкурентоспособность				
Критерии оценки	Вес кригерия	Бф	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>		
1	2	3	4	5	6	7	8		
Технические критерии с	ценки рес	урсоэ	ффе	ктивн	юсти				
1. Скорость расчета	0,2	5	3	3	1	0,6	0,6		
2. Требования к ПК	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,2		
3. Надежность	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5		
4. Использование актуальных баз данных	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25		
5. Погрешность расчетов	0,05	5	3	3	0,25	0,15	0,15		
6. Обратная связь с разработчиком ПО	0,1	3	4	4	0,3	0,4	0,4		
7. Обновление ПО	0,01	2	4	4	0,02	0,04	0,04		
8. Простота использования	0,09	5	2	3	0,45	0,18	0,27		
Экономические крите	рии оцени	си эфс	рект	ивнос	ти				
1. Конкурентоспособность метода	0,1	3	5	5	0,3	0,5	0,5		
2. Стоимость разработки	0,1	5	1	1	0,5	0,1	0,1		
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25		
4. Финансирование разработанного метода	0,05	5	2	2	0,25	0,1	0,1		
Итого	1				4,47	3,27	3,36		

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что использованный в данной магистерской диссертации метод моделирования с наиболее помощью авторских гидродинамических кодов является оптимальным для использования в практических целях. Конкурентные методы моделирования с использованием более сложной и дорогостоящей техники, а также дорогих пакетов программ является экономическим невыгодным. По результатам анализа, действительно способным заинтересовать потенциальных партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения продукта качеством не уступающего конкурентам, однако, требующего существенно меньших затрат на оборудование для его использования.

#### 3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Возможности	Сильные стороны проекта								
проекта	C1	C5							
B1	+	+	+	+	+				
B2	+	+	+	+	+				
B3	+	+	—	+	+				
B4	+	+	+	+	+				
B5	+	+	+	+	+				

## Таблица 2 – Интерактивная матрица проекта

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 3.

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Научная новизна.	Сл1. Наличие
	С2. Современная технология.	человеческого фактора.
	С3. Возможность контроля	Сл2. Возможность
	процесса расчета.	появления погрешности
	С4. Наличие актуальных данных	расчета.
	по взаимодействию ИПЗЧ, а в	Сл3. Продолжительное
	частности МИП с веществом	время расчетов.
	С5. Построение математической	Сл4. Высокий уровень
	модели взаимодействия МИП с	знаний для выполнения
	конструкционными материалами.	расчетов.
		Сл5. Появление более
		точных программ.
Возможности:	Результаты анализа интерактивной	Результаты анализа
В1. Использование	матрицы проекта полей «Сильные	интерактивной матрицы
расчетов для атомной	стороны и возможности»:	проекта полей «Слабые
промышленности и	1. Научная новизна, и, как	стороны и возможности»:
научной отрасли.	следствие, публикации в	1. Возникновение ошибок
В2. Возможность	цитируемых научных журналах.	из-за длительных
расчета	2. Получение данных расчётов,	расчетов. Данный фактор
конструкционных	содержащих сведения о	при внимательной работе
материалов (КМ).	радиационных, тепловых и ударно	можно свести к
ВЗ. Актуальность темы	волновых эффектах, проходящих в	минимуму или устранить
для публикации в	мишени, в любой момент времени.	BOBCE.
научных журналах.		2. Требование наличия
В4. Возможность		обширных знаний по
повышения		программированию и
эксплуатационных КМ.		существующих данных о
В5. Дополнительный		модифицировании
спрос на результаты		свойств КМ.
расчетов.		

Таблица 3 – SWOT-анализ

Продолжение таблицы 3.

Угрозы:	Результаты анализа интерактивной	Результаты анализа		
У1. Недостаточная	матрицы проекта полей «Сильные	интерактивной матрицы		
точность расчетов.	стороны и угрозы»:	проекта полей «Слабые		
У2. Низкий спрос на	1. Реакторостроение стремительно	стороны и угрозы»:		
результаты при	развивается в сторону,	1. Наиболее уязвимые		
отсутствии публикаций.	преимущественно в сторону	места – высокие		
УЗ.Недостаточность	ВВЭР. Продление и повышение	требования к знаниям		
имеющихся источников	ресурса реакторных установок	инженера для расчётов,		
для проверки	является актуальной задачей,	уменьшение погрешности		
полученных	которая в данный момент уже расчётов зависит			
результатов.	опирается на результаты	современных актуальных		
У4. Использование	моделирования, хотя и в меньшей	данным по теме		
потенциальными	степени на результаты	исследования,		
покупателями	моделирования поведения КМ под	достоверность которых не		
противоположного	реакторным облучением.	зависит от инженера.		
метода прогнозирования	2. Несмотря на возможные			
свойств КМ.	неточности расчётов, результаты			
У5. Появление более	являются необходимыми для			
современных и	принятия решения внедрения			
совершенных	модели взаимодействия МИП с			
технологий	КМ на производство.			
моделирования.				

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества метода моделирования системы «МИП металл» с использованием авторских гидродинамических кодов для прогнозирования свойств КМ значительно преобладают над её недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

# 3.2 Планирование управления научно-техническим проектом 3.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР), представленная на рисунке 20, представляет детализацию укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 20 – Иерархическая структура работ

## 3.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	01.02.2017	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	03.02.2017	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	05.02.2017	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2017	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2017	План работ
6	Сбор материала по теме диссертации	13.02.2017	Отчёт

Продолжение таблицы 4.

7	Исследование системы «МИП-КМ»	14.02.2017	Отчёт
0	Расчетная математическая модель на	15.02.2017-	Omuän
0	базе гидродинамических кодов	30.03.2017	Orgen
9	Анализ полученных данных	28.03.2017	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2017	Отчёт
11		14.02.2017-	
11	Составление пояснительной записки	25.04.2017	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения	26.04.2017	
12	по ГОСТу пояснительной записки	20.04.2017	
12		27.04.2017-	
13	подготовка к защите	25.05.2017	

## 3.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.

Линейный график представлен в таблице 5.

Таблица 5- Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников	
1	Разработка технического задания	2	01.02.2017	3.02.2017	Руководитель	
2	Составление и утверждение технического задания	2	03.02.2017	5.02.2017	Руководитель	
3	Выбор направления исследований	5	05.02.2017	10.02.2017	Руководитель, студент	
4	Подбор и изучение материалов по теме	2	10.02.2017	12.02.2017	Студент	
5	Календарное планирование работ	1	12.02.2017	13.02.2017	Руководитель, студент	
6	Обзор научной литературы, а также статей по теме диссертации	Обзор научной литературы, а также статей по теме лиссертации		14.02.2017	Студент	
7	Исследование системы «МИП-КМ»	1	14.02.2017	14.02.2017	Студент	

Продолжение таблицы 5.

8	Расчетная математическая модель на базе гидродинамических кодов	45	15.02.2017	30.03.2017	Студент	
9	Анализ полученных данных	2	28.03.2017	30.03.2017	Студент	
10	Обобщение и оценка результатов	1	30.03.2017	30.03.2017	Руководитель, студент	
11	Составление пояснительной записки	72	14.02.2017	25.04.2017	Студент	
12	Проверка правильности выполнения по ГОСТу пояснительной записки	1	26.04.2017	27.04.2017	Руководитель, студент	
13	Подготовка к защите	29	27.04.2017	25.05.2017	Студент	

В таблице 6 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 6 – Календарный план-график проведения научного исследования

	Вил работ		т		Пр	одо	лж	ите.	льн	ост	ь ві	ыпо	лне	ения	я ра	бот	
No		Исполнители	I <sub>к</sub> , коп	$\Gamma_{\kappa}, \Phi e$		Феврал		Март		Апрель		пь	Май		á	Июн	
512	вид работ	menommen	пц		Ь		1.	nup	1	11	np <b>e</b>		Ivian			Ь	
			дп.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
	Разработка																
1	технического	Руководитель	2	$\square$													
	задания																
	Составление и																
2	утверждение	Викоролитони	2		N												
2	технического	т уководитель	2		N												
	задания																
	Выбор	Рукоролитени			$\square$												
3	направления	г уководитель,	5														
	исследований	студент	ĮCHI														
	Подбор и изучение																
4	материалов по	Студент	2														
	теме																
	Календарное	Викоронитони			$\sum$	1											
5	планирование	т уководитель,	1														
	работ	студент															
	Обзор научной																
6	литературы, а также	Стулент	1														
	статей по теме	Студент	1														
	диссертации																

Продолжение таблицы 6.



## 3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### 3.3.1 Расчёт материальных затрат

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3-5 % от цены).

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Затраты на освещение вычисляются следующим образом:

$$3_{oce} = \frac{(15 \cdot S_f \cdot M \cdot t)}{1000} \cdot C, \tag{6}$$

где  $S_f$  – площадь пола (45 м<sup>2</sup>);

М – количество часов искусственного освещения в сутки (7 ч);

t – число рабочих дней (38);

С – стоимость 1 кВт/ч электроэнергии (5,8 руб).

$$3_{\text{осв}} = \frac{(15 \cdot 45 \cdot 7 \cdot 38)}{1000} \cdot 5,8 = 1\ 041,39$$
 руб.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{_{\mathfrak{I}\mathfrak{I}}} = \mathcal{I}_{_{\mathfrak{I}\mathfrak{I}}} \cdot P \cdot T_{_{ob}},\tag{7}$$

где Ц<sub>эл</sub> – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб за1кВт/ч);

Р – мощность оборудования кВт;

F<sub>об</sub> – время использования оборудования, ч.

В данной работе использовался портативный компьютер с мощностью 400 Вт. В среднем в сутки работа на компьютере и спектрометре составляла 6 часов. В период проведения настройки программы, проведения измерений и анализа было затрачено примерно 230 часов. Тогда затраты на электроэнергию за время выполнения проекта составляют:

 $C_{_{ЭЛЕКТ}} = (5,8.0,4.230) + (5,8.0,2.230) + (5,8.0,37.230) = 1$  293,98 руб.

Материальные затраты, необходимые для данной работы, были занесены в таблицу 7.

Наименование	Количество, шт	Цена за ед., руб	Затраты на материалы, руб
Шариковая ручка	1	35	35
Пачка бумажных листов формата А4	1	250	250
Карандаш грифельный	1	20	20
Ластик	1	15	15
Картриджи для принтера	1	500	500
	ИТОГО		820

Таблица 7 – Материальные затраты исследования

С учетом затрат на электроэнергию материальные затраты составили:

1 041,39 + 1 293,98 = 2 335,37 руб.

## 3.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{3\Pi} = 3_{\rm och} + 3_{\rm don},$$
 (8)

где *З*<sub>осн</sub> – основная заработная плата;

Здоп – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата (Зосн) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathcal{B}_{\text{och}} = \mathcal{B}_{\text{дH}} \cdot T_{\text{pa6}},\tag{9}$$

где *З*<sub>осн</sub> – основная заработная плата одного работника;

*T*<sub>раб</sub> – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

 $3_{\rm дh}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{ZH}} = \left(\boldsymbol{\beta}_{\mathrm{M}} \cdot \boldsymbol{M}\right) / \boldsymbol{F}_{\mathrm{Z}},\tag{10}$$

где *З*<sub>м</sub> – месячный должностной оклад работника, руб.;

М – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб.дня М =11,2 месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб.дней М=10,4 месяца, 6-дневная неделя;

*F*<sub>д</sub> – действительный годовой фонд рабочего времени научнотехнического персонала, раб.дн.

В таблице 8 представлен баланс рабочего времени.

Таблица 8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество рабочих дней:	299	299
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	56	48
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251

Месячный должностной оклад работника:

$$\mathbf{3}_{\mathsf{M}} = \mathbf{3}_{\mathsf{G}} \cdot \mathbf{k}_{\mathsf{p}},\tag{11}$$

где 3<sub>6</sub> – базовый оклад, руб;

k<sub>p</sub> – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 9.

Исполнители	З₅, руб	kp	Зм, руб	З <sub>дн</sub> , руб	Т <sub>раб,</sub> раб. дн.	Зосн, руб
Руководитель	19 600	1,3	25 480	1 090,50	6	6 543
Студент	1 750	1,3	2 275	94,3	111	10 467

Таблица 9 – Расчет основной заработной платы

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

 оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор;

 стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д;

– иные выплаты; районный коэффициент.

## 3.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$\boldsymbol{\beta}_{\text{доп}} = \boldsymbol{k}_{\text{доп}} \cdot \boldsymbol{\beta}_{\text{осн}},\tag{11}$$

где *З*<sub>доп</sub> – дополнительная заработная плата, руб.;

*k*<sub>доп</sub> – коэффициент дополнительной заработной платы;

Зосн – основная заработная плата, руб.

Примем коэффициент дополнительной заработной платы для научного руководителя равным 12 %. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 10

	10	n	~		U		U	~
	10 -	≺ana	DOTUGO	ппата	исполнителеи	исспепоратени	CVOU	nanotli
гаолица	10 -	Jana	оотпал	IIJIaIa	NULUUIIIIIUUUU	послодователе	<b>NON</b>	
1						F 1		1

Заработная плата	Руководитель	Студент
Основная зарплата	6 543	10 467
Дополнительная зарплата	982	0
Зарплата исполнителя	7 525	10 467
Итого по статье С <sub>зп</sub>	17 9	92

## 3.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{BHEO}} = k_{\text{BHEO}} \cdot \left(3_{\text{OCH}} + 3_{\text{don}}\right),\tag{12}$$

где  $k_{_{6Hefo}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и другие).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{e\mu\rho\bar{\rho}} = 0,3 \cdot (6543 + 982) = 2257,5$$
 py6.

## 3.3.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и

ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и другого оборудования.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{_{HAKI}} = k_{_{HAKI}} \cdot \left( 3_{_{OCH}} + 3_{_{\partial On}} \right), \tag{13}$$

где  $k_{_{\!\!H\!\!A\!K\!\!N}}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в составляют 12-16 % от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, участвующих в выполнении темы.

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 11.

Tuomidu II – I uo ioi olodikolu sulput noonodobulombekelo npoekiu
---

№ п/п	Наименование статьи	Сумма, руб		
1	Материальные затраты	2 335,37		
2	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	17 010,00		
3	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	982,00		
4	Отчисления на социальные нужды	2 257,50		
5	Затраты на амортизационные отчисления	14 566,00		
6	Накладные расходы	2 879,72		
	Итого	40 029,59		

## 3.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и
задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель). Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 21.



Рисунок 21 – Организационная структура научного проекта

#### 3.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 12.

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менелжмент»	Консультант раздела «Соцответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	0				
Составление и утверждение технического задания	О, У				
Выбор направления исследований					И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	0				И
Обзор научной литературы, а также статей по теме лиссертации					И
Исследование системы «МИП-КМ»					И
Расчетная математическая модель на базе гидродинамических кодов					И
Анализ полученных данных	0				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов					И
Составление пояснительной записки					И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки					И
Подготовка к защите					И

# Таблица 12 – Матрица ответственности

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

и контролирующее его ход;

исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках
 этапа проекта;

утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение
 результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

 согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

<sup>-</sup> ответственный (O) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта

#### 3.6 Определение сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (см. табл. 3.6). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{\phi \mu \mu p}^{ucn.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},\tag{14}$$

где *І*<sup>*ucni*</sup><sub>*финр*</sub> – интегральный финансовый показатель разработки;

 $\Phi_{pi}$  – стоимость *i*-го варианта исполнения;

 $\Phi_{\rm max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\phi u \mu p}^{p} = \frac{\Phi_{p}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{111373,87}{111373,87} = 1;$$

Для аналогов (с использованием ПО, которое стоит 10000 рублей и 15000 рублей) соответственно:

$$I_{\phi u \mu a 1}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{121373,87}{111373,87} = 1,09; I_{\phi u \mu a 1}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{126373,87}{111373,87} = 1,13;$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i , \qquad (15)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения разработки;

*a<sub>i</sub>* – весовой коэффициент *i*-го варианта исполнения разработки;

 $b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка *i*-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

*n* – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Оценка характеристик исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1.Способствует росту производительности труда пользователя	0,4	5	3	2
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	5	2	2
3. Помехоустойчивость	0,1	5	4	4
4. Надёжность	0,25	5	4	4
5. Материалоёмкость	0,15	5	3	4
ИТОГО	1	5	3,1	2,9

 $I_{\text{trn}} = 5 \cdot 0.4 + 5 \cdot 0.2 + 5 \cdot 0.1 + 5 \cdot 0.25 + 5 \cdot 0.15 = 5;$ 

Аналог 1 = 3.0, 4 + 2.0, 2 + 4.0, 1 + 4.0, 25 + 3.0, 15 = 3, 45;

Аналог 2 =  $2 \cdot 0.4 + 2 \cdot 0.2 + 4 \cdot 0.1 + 4 \cdot 0.25 + 4 \cdot 0.15 = 3.2$ .

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{\phi u \mu p}^{p}$ ) и аналога ( $I_{\phi u \mu ai}^{ai}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\phi u \mu p}^{p} = \frac{I_{m}^{p}}{I_{\phi u \mu p}^{p}}; I_{\phi u \mu a i}^{a i} = \frac{I_{m}^{a i}}{I_{\phi u \mu a i}^{a i}};$$
(15)

В результате:

$$I_{\phi u \mu p}^{p} = \frac{I_{m}^{p}}{I_{\phi u \mu p}^{p}} = \frac{5}{1} = 5; \ I_{\phi u \mu a1}^{a1} = \frac{I_{m}^{a1}}{I_{\phi u \mu a1}^{a1}} = \frac{3,45}{1,09} = 3,16; \ I_{\phi u \mu a2}^{a2} = \frac{I_{m}^{a2}}{I_{\phi u \mu a2}^{a2}} = \frac{3,2}{1,13} = 2,83.$$
(16)

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\Theta_{cp} = \frac{I^{p}_{\phi \mu \mu p}}{I^{ai}_{\phi \mu \mu ai}} \tag{17}$$

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта и сравнительная эффективность анализа представлены в таблице 14.

N⁰	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,09	1,13	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,45	3,2	5
3	Интегральный показатель эффективности	3,16	2,83	5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,58	1,76	1

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

# 4 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Охрана труда – это система законодательных, социальноэкономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебнопрофилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [153].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [153], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие работающего которого на В заболеванию определенных условиях приводит или К снижению трудоспособности.

# 4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. В таблице 15 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы. Таблица 15 — Основные элементы производственного процесса, формирующие

опасные и вредные факторы

Наименование видов	ФАКТОРЫ		
работ и параметров	ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные
производственного	Вредные Опасные		документы
процесса			
		Электрический	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ.
		ток	Электробезопасность
Работа на ПЭВМ, Кафедра ФЭУ НИ ТПУ	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и так далее)		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
			Санитарно-
			эпидемиологические
			правила и нормативы.
			«Гигиенические
			требования к ПЭВМ и
			организация работы»
		Пожарная безопасность	Пожаро- и
			взрывобезопасность
			промышленных объектов.
			ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ
			Пожарная безопасность

При работе на ПЭВМ на студента воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое
 электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие
 излучения;

– психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервнопсихические перегрузки.

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

# 4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной

санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, работающие на ПЭВМ, не должны иметь медицинских противопоказаний. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

#### 4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, в качестве примера рисунок 22 иллюстрирует зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости.



Рисунок 22 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
 в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680– 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420– 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края.

# 4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность,

скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [154] и приведены в таблице 16.

Таблица 16 — Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека — не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20–25 °C, зимой — 13–15 °C. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками

кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [143] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5Гц до 2кГц — 25В/м;

- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5Гц до 2кГц — 250нТл;

- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

– применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [154] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 99,72 мкбэр/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

# 4.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

 при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

 при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Электрический ток, проходя через организм человека, оказывает биологическое, электролитическое, теплое и механическое воздействие.

Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении тканей и органов. Вследствие этого наблюдается судороги скелетных мышц, которые могут привести к остановке дыхания, отрывным переломам и вывихам конечностей, спазму голосовых связок.

Электрическое действие тока проявляется в электролизе (разложении) жидкостей, в том числе и крови, а также существенно изменяет функциональное состояние клеток.

Тепловое действие электрического тока приводит к ожогам кожного покрова, а также гибели подкожной тканей, вплоть до обугливания.

Механическое действие тока проявляется в расслоении тканей и даже отрывах частей тела.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

 – отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;

 покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей)
 [155].

# 4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [156], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;

- работа с открытой электроаппаратурой;

- короткие замыкания в блоке питания;

- несоблюдение правил пожарной безопасности;

наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

– исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

 применение при строительстве и отделке зданий несгораемых или трудно сгораемых материалов;

– правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

 обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

– издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

 соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

– правильное размещение оборудования;

– своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;

– позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;

– принять меры в соответствии с инструкцией.

#### Заключение

Радиационно-динамическое воздействие с характерным временем взрывного энерговыделения, составляющим порядка 10<sup>-12</sup>с (время термализации каскада), является по существу безальтернативным способом инициирования самораспространяющихся структурно-фазовых превращений в метастабильных средах. Это позволяет модифицировать их структуру и свойства.

Действительно, если использовать для этого химический взрыв с характерным временем порядка  $10^{-5}$  с, то необходимо увеличить размеры зоны объемного энерговыделения ( $d_o=2R_o$ ) до нескольких сантиметров и мощность энерговыделения до уровня, сравнимого с воздействием боевых зарядов.

Различные виды корпускулярного излучения, за исключением частиц с массой, меньшей массы нуклона, образуют зоны взрывного энерговыделения в конденсированных средах с эмиттацией ударных волн. Плотность энергии в этих зонах может превышать 0,5 эВ/ат. При этом уносимая ударной волной энергия достаточна для инициирования перехода метастабильных сред в состояние с более низкой свободной энергией.

Генерируемые облучением ударно-волновые процессы и фазовые превращения, описываемые уравнениями гидродинамики, а также инициируемые распространением волн процессы структурных перестроек типа цепных реакций относятся к радиационно-динамическим эффектам в отличие от хорошо изученных радиационно-стимулированных миграционных процессов.

Радиационно-динамическое воздействие излучений на метастабильные предложить радиационного среды позволяет операцию отжига конденсированных сред (в качестве альтернативы печному отжигу). Эффективность такого отжига доказана экспериментально на примерах, приведённых выше, восстановления пластичности алюминиевых сплавов (снятие нагартовки).

Состояния, достижимые при радиационном отжиге, могут существенно отличаться от состояний, формирующихся при печном отжиге, что открывает новые возможности управления свойствами материалов. Радиационный отжиг требует существенно меньших затрат энергии, значительно меньшего времени обработки и протекает при существенно (на 50-200 К) более низких температурах.

Следует подчеркнуть, что радиационный отжиг пучками ускоренных ионов не приводит к активации полос сплавов (т.е. к появлению наведенной радиоактивности). Он является абсолютно экологически чистым и существенно более экономичным по сравнению с традиционными видами обработки [141].

Определены характерные области в пространстве (j, U) реализации термоупругих и абляционных механизмов формирования импульсных механических напряжений.

Установлено что при абляционном механизме генерации возможно формирование как однополярной, так и биполярной структуры импульсного возмущения.

Обнаружена область параметров пучка, при которых формирующееся биполярное возмущение в фазе «разрежение» имеет амплитуду по модулю превосходящую предел текучести. В этой области возможна реализация откольных явлений на облучаемой поверхности.

При постепенном увеличении параметров пучка происходит насыщение в амплитудных параметрах импульсного возмущения, при этом амплитуда начинает не зависеть от конкретных значений плотности тока и энергии ионов, а определяется интегральным энерговкладом.

# Список публикаций

1. Boyko V. I., Daneykin Y. V., Lisov V. I., Pimenov E. Y. Generation of Mechanical Waves in Metals under the High Power Ion Beam Irradiation // Advanced Materials Research. - 2015 - Vol. 1084. - p. 225-233

2. Бойко В. И., Данейкин Ю. В., Пименов Э. Ю., Лисов В. И. Характеристики ударно-волнового возмущения в металлах при облучении ионными пучками // Известия вузов. Физика. - 2014 - Т. 57 - №. 11/2. - С. 151-156

3. Пименов Э. Ю., Лисов В. И. Взаимодействие мощных ионных пучков с металлическими поглотителями // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых: сборник научных трудов VI Всероссийской конференции. - 2015. -С. 200-203

4. Пименов Э. Ю., Лисов В. И. Исследование возможности применения сатистических методов анализа при экологическом мониторинге уровня загрязнения атмосферы города Томска // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов.-2015. -С.61

5. Пименов Э. Ю., Лисов В. И. Применение импульсных нейтронных генераторов для неразрушающего контроля делящихся материалов // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов.-2015. - С.62

6. Пименов Э. Ю., Лисов В. И. Общая организация радиационного контроля и радиационной безопасности на производстве. Определение дозы внутреннего облучения на производстве на примере предприятия «АО УМЗ» // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов.-2015. -С.63

7. Ю. В. Данейкин, В. И. Лисов, Э. Ю. Пименов. Взаимодействие мощного ионного пучка с металлической мишенью // XIII Курчатовская молодёжная научная школа: сборник аннотаций.-2015. -С.196

8. Pimenov Eduard, Daneykin Yuriy, Boiko Vladimir, Lissov Vladislav. Radiation, heat and shock-wave processes in the system "high power ion beam - metal"//The 19th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams (SMMIB-19): abstracts.-2015.-P.78

9. Е. Ү. Pimenov, Ү. V. Daneykin, V. I. Lissov. Research of the condensed beam stop dynamics under loading with a high-power ion beam of power density  $\geq 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>. // VIII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине»: сборник научных трудов.-2016.-С.148

10. Дисюк В.В., Чертков Ю.Б., Пименов Э.Ю. Разработка и тестирование расчётной модели реактора ВК-50 на базе кода MCU-RR // XXX Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты": сборник трудов. – 2016.

#### Список используемых источников

 Диденко А.Н. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов / А.Н. Диденко, А.Е. Лигачев, И.Б. Куракин. -М.: Энергоатомиздат, 1987. - 184 с.

 Диденко А.Н. Эффекты дальнодействия в ионноимплантированных металлических материалах / А.Н. Диденко, Ю.П. Шаркеев,
 Э.В. Козлов, А.И. Рябчиков. - Томск: Изд-во НТЛ, 2004. - 328 с.

 Анищик В.М. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками / В.М. Анищик, В.В. Углов. - Минск: БГУ, 2003. - 191 с.

4) Biersack J.P. A Monte Carlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous Targets / J.P. Biersack, L.G. Haggmark // Nucl. Instr. & Meth. - 1980. - V. 174. - P. 257-269.

Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты.
 Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред / В.В. Овчинников // Успехи физических наук. - 2008. - Т. 178. - № 9. - С. 991-1001.

Chukov V.P. The role of shock wave in low-energy recoil radiation damage / V.P. Zhukov, A.V. Ryabenko // Rad. Eff. - 1984. - V. 82. - № 3/4. - P. 85-95.

 Жуков В.П. Генерация упругих волн при эволюции пиков смещений / В.П. Жуков, А.А. Болдин // Атомная энергия. - 1987. - Т. 63. - № 6. -С. 375-379.

 8) Структурные особенности алюминиевого сплава 1441, подвергнутого облучению ионами Ar<sup>+</sup> / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.С. Чемеринская, А.Р. Школьников, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов, Л.И. Кайгородова // Известия вузов. Физика. - 2007. - № 2. - С. 73-81.

9) Изменение механических свойств и структуры алюминиевого сплава АМг6 (Al-Mg) после облучения ионами Ar<sup>+</sup> и после термического отжига / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов, В.В. Сагарадзе, Н.Ф. Вильданова // Известия вузов. Физика. - 2008. - № 11/2. -С. 56-61.

Буренков А.Ф. Пространственные распределения энергии,
 выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах / А.Ф. Буренков,
 Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, М.М. Темкин. - М.: Энергоиздат, 1985. - 248с.

 Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге: Пер. с нем. под ред. М.И. Гусевой. - М.: Наука, 1983. - 360 с.

Овчинников В.В. Имплантация ускоренных ионов в вещество / В.В.
 Овчинников // Методическое пособие. - Издание УГТУ, 1999. - 21 с.

13) Овчинников В.В. От проблем радиационной защиты и радиационной стойкости к технологиям радиационной обработки материалов / «Электрофизика на Урале: четверть века исследований» под ред. В.Г. Шпака. - Екатеринбург: УрО РАН, 2011. - 456 с.

14) Гусева М.И. Ионная имплантация в металлах / М.И. Гусева // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - № 4. - С. 27-50.

15) Гусева М.И. Ионная имплантация в неполупроводниковые материалы / М.И. Гусева // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. Физические основы лазерной и пучковой технологии. - М.: ВИНИТИ, 1984. - Т. 5. - С. 554.

16) Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж.М. Поута, Г. Фоти, Д.К. Джекобсона; пер. с англ. под ред. А. А. Углова. - М.: Машиностроение, 1987. - 424 с.

17) Ovchinnikov V.V. Change of electrical properties of alloys and excitation of low-temperature atom mobility by ion bombardment / V.V. Ovchinnikov, V.I. Chernoborodov, Yu.G. Ignatenko // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B. - 1995. - V. 103. - P. 313-317.

 18) Овчинников В.В. Мессбауэровская спектроскопия ионнолегированных металлов и сплавов / В.В. Овчинников // Металлы. - 1996. - № 6.
 - С. 104-129.

19) Влияние ионно-лучевой обработки на магнитные свойства магнитомягких материалов / Б.К. Соколов [и др.] // ФММ. - 2000. - Т. 89. - С. 32-34.

 Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф.Ф. Комаров. - М.: Металлургия, 1990. - 216 с.

21) Nastasi M. Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications / M. Nastasi, J.W. Mayer, J.K. Hirvonen // Cambridge: Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, 1996. - 540 p.

22) Kreindel Yu.E. Structural Transformations and Long-Range Effects in Alloys Caused by Gas Ion Bombardment / Yu.E. Kreindel, V.V. Ovchinnikov // Vacuum. - 1990. - V. 42. - N 1/2. - P. 81-83.

23) Goloborodsky B.Yn. Long range effects in FePd<sub>2</sub>Au Alloy under Ion Bombardment / B.Yn. Goloborodsky, V.V. Ovchinnikov, V.A. Semenkin // Fusion Technology. - 2001. - V. 39. -P. 1217-1228.

24) Dislocation structures in near-surface layers of pure metals formed by ion implantation / A.N. Didenko [et al.] // Materials Science and Engineering. - 1989.
- V. A115. - P. 337-341.

25) Жуков В.П. Расчет пиков смещения в приближении сплошной среды / В.П. Жуков, А.В. Демидов // Атомная энергия. - 1985. - Т. 59. - Вып. 1. -С. 29-33.

26) Chudinov V.G. Kinetics of Diffuse Processes within a Cascade Region in the SubThreshold of FCC and HCP / V.G. Chudinov, R.M.J. Cotterill, V.V. Andreev // Metals. Phys. Stat. Sol. (A). - 1990. - V. 122. - P. 111-120.

27) Мартыненко Ю.В. Распыление металла быстрыми многозарядными ионами / Ю.В. Мартыненко, Ю.Н. Явлинский // ЖТФ. - 1990. - Т. 58. - Вып. 6. -С.1164-1171. 28) Ионная имплантация / Под ред. Дж. К. Хирвонена. - М.; Металлургия, 1985. - 391 с.

29) Распыление под действием бомбардировки частицами. Вып. IIIХарактеристики распыленных частиц, применение в технике : пер. с англ. / Ред.Р. Бериш, К. Виттмак. - М.: Мир, 1998. - 551 с.

30) Tholen A.R. Possible wave formation and martensitic transformation of iron particles in cooper single crystals during argon ion bombardment / A.R. Tholen, Chang Li, K. E. Easterling // J. Apple. Phys. - 1983. - V. 54 (2) - P.1067 - 1070.

31) Дефекты и радиационные повреждения в металлах / М. Томпсон; пер. с англ. под ред. В.Е. Юрасова. - М.: Мир. - 1971. -368 с.

32) Быковский Ю.А. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов / Ю.А. Быковский, В.Н. Неволин, В.Ю. Фоминский. - М.:
 Энергоатомиздат, 1991. - 237 с.

33) Кирсанов В.В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах / В.В. Кирсанов, А.Л. Суворов, Ю.В. Трушин. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 272 с.

34) Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов / А.В. Белый [и др.]. - Минск: Физико-технический институт, 1998.
 - 220 с.

35) Фазовые превращения при облучении / Под ред. В.Ф. Нолфи; пер. с англ. М.Е. Резницкого, В.М. Устинщикова, А.Б. Цепелева под ред. Л.Н. Быстрова. - Челябинск: Металлургия, 1989. - 312 с.

36) Овчинников В.В. Мессбауэровские методы анализа атомной и магнитной структуры сплавов / В.В. Овчинников. - М.: Физматлит, 2002. - 256 с.

37) Аброян И.А. Физические основы ионного внедрения и изменения свойств поверхности / И.А. Аброян // Известия Академии наук. Серия физическая. - 1996. - Т. 60. - № 7. - С. 62-81.

38) Мартыненко Ю.В. Эффекты дальнодействия при ионной имплантации / Ю.В. Мартыненко // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. - М.: ВИНИТИ, 1993. - Т.7. - С. 82-112.

39) Эффект доупорядочения при бомбардировке ускоренными ионами / С.Н. Бородин, Ю.Е. Крейндель, Г.А. Месяц, В.В. Овчинников // Письма в ЖТФ.
- 1989. - Т. 15. - Вып. 13. - С. 87-90.

40) Нетепловые фазовые переходы и эффекты дальнодействия при облучении сплавов ускоренными ионами / С.Н. Бородин, Е.Ю. Крейндель, Г.А. Месяц, В.В. Овчинников [и др.] // Письма в ЖТФ. - 1989. - Т. 15. - Вып. 17. - С. 51-55.

41) Крейндель Ю.Е. Фазовые превращения нетепловой природы и эффекты дальнодействия при бомбардировке сплавов ионами газов / Ю.Е. Крейндель, В.В. Овчинников // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 3. - С. 14-20.

42) Field ion microscopy investigation of the disorder-to-order transformation in FePd2Au after bombardment by Ar+ ions / N.N. Syutkin, V.V. Ovchinnikov, E.F. Talantsev, V.I. Chernoborodov // Philosophical Magazine A. - 1994. - V.70. -  $N_{2}$  3. - P. 439-445.

43) The formation of extraordinary magnetic states in an iron-neckel alloy with b.c.c.-f.c.c transitions induced by ion irradiation / V.V. Ovchinnikov [et al.] // Surface and Coating Technology. - 1994. - V. 64. - P. 1-4.

44) Investigation of effect of irradiation with gaseous and metallic ions on atomic structure of alloy Fe+15 at.% Cr. / V.V. Ovchinnikov, B.Yu. Goloborodsky, N.V. Gushchina [et al.] // Processing 6<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, 2002. - P. 212-216.

45) Enhanced Atomic Short-Range Ordering of Alloy Fe-15 at.% Cr Caused by Ion Irradiation at Elevated Temperature and Thermal Effects Only / V.V. Ovchinnikov, B.Yu. Goloborodsky, N.V. Gushchina, V.A. Semionkin, E. Wieser // Appl.Phys.A. - 2006. - V. 83. - P. 83-88.

46) Исследование закономерностей  $\alpha$  (ОЦК)  $\rightarrow \gamma$  (ГЦК) превращения в сплаве Fe + 8,25 ат. % Mn в ходе ионного облучения / В.В. Овчинников, Б.Ю. Голобородский, Н.В. Гущина [и др.] // Труды VI Междунар. конф. по

модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками, Томск, 2002. - С. 292-296.

47) Изучение радиационно-динамических эффектов в сплаве Fe + 8,25 ат.% Мп при комбинированном электромагнитном и ионном облучении / В.В. Овчинников, Б.Ю. Голобородский, Н.В. Гущина [и др.] // Труды XIII Междунар. совещ. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 2003. -М.: НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ), 2003. - С. 587591.

48) Быков В.Н. Эффект дальнодействия при ионном облучении / В.Н. Быков, В.Г. Малынкин, В.С. Хмелевская // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 1989. - Вып. 3(50). - С. 45-52.

49) Хмелевская B.C. Неравновесные состояния И локальная перестройка кристаллической решетки, индуцированные ионным облучением / В.Г. B.C. Хмелевская, B.C. Крапошин, Малынкин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 1998. - № 6. - С. 95-101.

50) Хмелевская В.С. Эффект дальнодействия как проявление коллективного взаимодействия в облучаемой металлической системе / В.С. Хмелевская, В.Г. Малынкин, М.Ю. Канунников // Поверхность. - 2003. - №7. - С. 66-70.

51) Хмелевская В.С. "Эффект дальнодействия" в материалах различной природы / В.С. Хмелевская, И.А. Антошина, М.Н. Кордо // ФММ. - 2007. - Т. 103. - №6. - С. 652-656.

52) Морозов Н.П. Глубокое проникновение радиационных дефектов из ионно-имплантированного слоя в объем полупроводников / Н.П. Морозов, Д.И. Тетельбаум // Физика и техника полупроводников. - 1983. - Т. 17. - Вып. 5 - С. 838-842.

53) Эффект дальнодействия при ионном облучении металлических фольг / П.В. Павлов [и др.] // Металлы. - 1993. - №3. - С. 78-83.

54) Дальнодействие в металлах и полупроводниках при ионном облучении / П.В. Павлов [и др.] // Высокочистые вещества. - 1993. - № 4. - С. 26-31.

55) Pogrebnjak A.D. Increased microhardness and positron annihilation in Al exposed to a high-power ion beam / A.D. Pogrebnjak, Sh.M. Ruzimov // Phys. Lett. A. - 1987. - V. 120. - № - P. 259-262.

56) Повышение циклической прочности металлов и сплавов методом ионной имплантации / Б.Г. Владимиров [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - № 7. - С. 139-147.

57) Дислокационные структуры приповерхностных слоев чистых металлов после ионной имплантации / А.Н. Диденко [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1989. - № 3. - С. 120-131.

58) Эволюция свойств поликристаллических металлов (на примере пленок Бе, Ni и фольг пермаллоя) при ионной имплантации / Е.В. Курильчик [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1992. - № 4. - С. 102-107.

59) Тетельбаум Д.И. Закономерности дальнодействующего влияния ионного облучения на микротвердость экранированных фольг пермаллоя / Д.И. Тетельбаум, Е.В. Курильчик, Е.Е. Доценко // Вестник Нижегородского университета. Сер. Физика твердого тела. - 1998. - Вып. 2 - С. 140-150.

60) О механизме малодозного эффекта дальнодействия / Д.И. Тетельбаум [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. - 2000. - Т. 64. - № 4. - С. 726-731.

61) Дальнодействующее знакопеременное изменение микротвердости металлических фольг при ионном и световом облучениях / Д.И. Тетельбаум [и др.] // Поверхность. - 2003. - № 4. - С. 67-69.

62) О механизме эффекта дальнодействия при облучении твердых тел /
 Д.И. Тетельбаум [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. - 1996. - Т. 60. - № 4. - С. 210-212.

63) Влияние экранирования на эффект дальнодействия при ионном облучении металлических фольг / Д.И. Тетельбаум [и др.] // Металлы. - 1996. - № 5. - С. 114-116.

64) Тетельбаум Д.И. Об энергетическом пороге эффекта дальнодействия при ионном облучении тонких фольг металлов / Д.И. Тетельбаум, Е.В. Курильчик // Высокочистые вещества. - 1995. - № 2. - С. 98-100.

65) Dearnaley G. The Effects of ion implantation upon the mechanical properties of metals and cemented carbides / G. Dearnaley // Rad. eff. - 1982. - V. 63.
- P. 1-15.

66) Dearnaley G. The alteration of oxidation and related properties of metals by ion implantation / G. Dearnaley // Nucl. Inst. and Meth. - 1981. - V. 182/183. -Part 2. - P. 899919.

67) Hubler G.K. Application of ion-implantation to wear protection of materials / G.K. Hubler, F.A. Smidt // Nucl. Inst. and Meth. - 1985. - № 7/8. - P. 151.

68) Мартыненко Ю.В. Утечка трития в термоядерном реакторе / Ю.В. Мартыненко, Ю.Н. Явлинский // Атомная энергия. - 1985. - Т.58. - Вып.2. - С. 111-113.

69) Успенская Г.В. Изменение межплоскостных расстояний в глубоких слоях кремния при бомбардировке ионами средних энергий / Г.В. Успенская, В.М. Генкин, Д.И. Тетельбаум // Кристаллография. - 1973. - Т. 18. - Вып. 2. - С. 363-366.

70) Массоперенос в монокристаллах молибдена и карбида кремния при облучении низкоэнергетическими ионами тлеющего разряда / А.А. Бабад-Захряпин [и др.] // Атомная энергия. - 1980. - Т. 48. - С. 98-100.

71) Поверхность вольфрама в гелиевой плазме тлеющего разряда / Суворов А.Л. [и др.] // Атомная энергия. - 1982. - Т.2. - Вып. 4. - С. 2-26.

72) Эффект дальнодействия в ионно-имплантированном сплаве Cu<sup>3</sup>Au /
 А.Ю. Бункин [и др.] // Физика металлов и металловедение. - 1990. - № 4. - С.
 171-175.

73) Сюткин Н.Н. Полевая ионная микроскопия ионноимплантированных сплавов / Н.Н. Сюткин, В.А. Ивченко // Изв. вузов. Физика.
- 1994. - № 5. - С. 41-58.

74) Ивченко В.А. Прямые методы исследования атомной структуры планарных дефектов при радиационном и других видах воздействия / В.А. Ивченко // Труды XII Междунар. совещ. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 2002. - М.: НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ), 2002. - С. 26-30.

75) Thompson D.A. High density cascade effects / D.A. Thompson // Radiation effects and defects in solids. - 1981. - V. 56. - № 3-4. - P. 105-150.

76) Дамаск А.С. Точечные дефекты в металлах. / А.С. Дамаск, Дж. Динс. - М.: Мир, 1966. - 305 с.

77) Duguotto D.J. The effect of low energy He+ ingestion on the surface structure of ordered Ni-base alloys / D.J. Duguotto, R.C. Krutent // Phil. Mag. - 1971.
- V. 24. - № 192. - P. 1411421.

78) Никитин А.А. / А.А. Никитин, Травина Н. Т., Гусева М. И. [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1984. - Т. 5. - С. 29.

79) The effect of ion implantation on the fatigue properties of polycrystalline copper / A. Kujore [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. - 1981. - V. 182/183. - P 949-958.

80) Имплантация ионов азота в сталь 12Х18Н10Т в условиях механического нагружения / Г.В. Гордеева [и др.] // Атомная энергия. - 1990. -Т. 68. - Вып. 3. - С. 210-211.

81) Мартыненко Ю.В. Ускорение диффузии ионно-имплантированной примеси при больших дозах / Ю.В. Мартыненко, П.Г. Московкин // ЖТФ. -1986. - Т. 61. - Вып. 1. - С. 179-180.

82) Matthews LM. Transmission electron microscopy of carbon-implanted
{111} copper surfaces / L.M. Matthews, C.A.B. Ball // J. Appl. Phys. - 1987. - V. 61.
- No. 6. - P. 2166-2169.

83) Структурные изменения в приповерхностных и глубинных слоях меди под действием плазмы газового разряда / Э.В. Козлов [и др.] // Цветные металлы. - 1991. - № 7. - С. 53.

84) Формирование дефектной структуры при воздействии на металлы плазмы газового разряда / Э.В. Козлов [и др.] // Известия вузов. Физика. - 1992.
- № 1. - С. 14-19.

85) Эволюция дислокационной структуры при обработке металлов и сплавов в плазме газового разряда / Н.А. Попова [и др.] // Эволюция дислокационной структуры. Упрочнение и разрушение сплавов. - Томск: Издво Том. ун-та. - 1992. - С. 107-115.

86) Козлов Э.В. Физическая картина модификации поверхностных слоев и объема металла при воздействии низкоэнергетической плазмы / Э.В. Козлов, И.В. Терешко, Н.А. Попова // Известия вузов. Физика. - № 5. - 1994. - С. 127-140.

87) Дислокационные структуры приповерхностных слоев чистых металлов после ионной имплантации / А.Н. Диденко [и др.] // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1989. - № 3. - С. 120-131.

88) Шаркеев Ю.П. Модификация микроструктуры и механических свойств чистых металлов ионными пучками высоких энергий / Ю.П. Шаркеев, Г.В. Пушкарева, А.И. Рябчиков // Известия вузов. Черная металлургия. - 1990. -№ 10. - С. 90-91.

89) Мартыненко Ю.В. Механизмы изменения глубоких слоев твердого тела при ионной бомбардировке / Ю.В. Мартыненко, П.Г. Московкин // Поверхность, физика, химия, механика. - 1991. - № 4. - С. 44-50.

90) Мартыненко Ю.В. Эффект дальнодействия и перенос энергии в твердых телах при ионной бомбардировке / Ю.В. Мартыненко, П.Г. Московкин // Неорганические материалы. - 1998. - Т. 34. - № 9. - С. 1142-1144.

91) Эффект дальнодействия в металлах при ионной имплантации / Шаркеев Ю.П. [и др.] // Металлы. - 1998. - № 1. - С. 109-115.

92) Структурные изменения глубинных слоев материала после модификации ионными пучками и природа его упрочнения / А.Н. Диденко [и др.] // ДАН СССР. Сер. тех. физ. - 1987. - Т. 296. - № 4. - С. 869-871.

93) Microstructure of the near-surface layers of ion-implanted polycrystalline Cu / A.N. Didenko [et al.] // Surface and Coatings Technology. - 1992. - V. 56. - P. 11-17.

94) Ионная имплантация и «эффект дальнодействия» в поликристаллическом α-Fe / A.H. Диденко [и др.] // Металлы. - 1993. - № 3. - С. 122-129.

95) Шаркеев Ю.П. Дислокационные структуры и упрочнение ионноимплантированных металлов и сплавов / Ю.П. Шаркеев, А.Н. Диденко, Э.В. Козлов // Известия вузов. Физика. - 1994. - № 5. - С. 92-108.

96) Дислокационная структура в крупнозернистой меди после ионной имплантации / Шаркеев Ю.П. [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 1996. - № 4. - С. 14-20.

97) The mechanisms of the long-range effect in metals and alloys by ion implantation / Sharkeev Yu.P. [et al.] // Surface and Coatings Technology. - 1996. - V. 83. - P. 15-21.

98) Ovchinnikov V.V. Mossbauer Analysis of the Atomic and Magnetic Structure of Alloys / V.V. Ovchinnikov // Cambridge, UK, 2006. - 248 p.

99) Влияние упругих волн, возникающих при ионной бомбардировке, на структурное совершенство полупроводниковых кристаллов / П.В. Павлов [и др.] // Физика и техника полупроводников. - 1986. - Т. 20. - Вып. 3. - С. 503-507.

100) Семин Ю.А. Усиление генерируемых ионной бомбардировкой упругих волн при распространении в кристалле с кластерами дефектов / Ю.А. Семин, В.Д. Скупов, Д.И. Тетельбаум // Письма в ЖТФ. - 1988. - Т. 14. - Вып. 3. - С. 273-276.

101) Ударно-акустические эффекты в кристаллах при ионном облучении
 / П.В. Павлов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 6. - С.53-57.

102) Инденбом В.Л. Новая гипотеза о механизме радиационностимулированных процессов // Письма в ЖТФ. - 1979. - Т. 5. - Вып. 8. - С. 489-492.

103) Анализ изменений структурного состояния сплава ВД1 (Al-Cu-Mg-Mn) под воздействием ионного облучения (Ar<sup>+</sup>, E = 40 кэВ) методом просвечивающей электронной микроскопии / В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.С. Чемеринская, А.Р. Школьников, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов, Л.И. Кайгородова // Физика металлов и металловедение. - 2008. - т. 105. - № 4. - с. 404-411.

104) Мамонтов А.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения / А.П. Мамонтов, И.П. Чернов. - М.: Энергоатомиздат, 2001. - 286 с.

105) Тетельбаум Д.И. Эффект дальнодействия в составных металлических мишенях при малых дозах облучения / Д.И. Тетельбаум, Е.В. Курильчик, Н.Д. Латышева // Неорганические материалы. - 1999. - Т.35. - №4. - С.1-5.

106) Ибрагимов Ш.Ш. Радиационные повреждения металлов и сплавов / Ш.Ш. Ибрагимов, В.В. Кирсанов, Ю.С. Пятилетов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.

107) Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами низких энергий / В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, Н.В. Гущина, В.И. Соломонов, О.А. Снигирева // Труды XV Международного совещания «Радиационная физика твердого тела» под ред. Бондаренко Г.Г. - М.: НИИ ПМТ МГИЭМ. - 2005. - с. 199-202.

108) Лямов В.Е. Физическая энциклопедия. В 5 томах. Главный редактор А.М. Прохоров / В.Е. Лямов, В.М. Левин, Л.А. Чернозатонский // М.: Советская энциклопедия, 1988.

109) Nordlung K. Coherent displacement of atoms during ion irradiation / K. Nordlung, J. Keinonen, M. Ghaly, R.S. Averback. // Nature. - 1999. - V. 398. № 4. P. 49.

110) Wolfer W. Radiation Effects in Plutonium / W. Wolfer // Los Alamos Science. - 2000. - V. 26. - P. 227.

111) Блейхер Г.А. Тепломассоперенос в твердом теле под воздействием мощных пучков заряженных частиц / Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, О.В. Пащенко. - Новосибирск: Наука, 1999. - 234 с.

112) О возможности формирования солитонообразных импульсов при ионной имплантации / С.Г. Псахье [и др.] // Письма в ЖТФ. - 1999. - Т. 25. - Вып. 6. - С. 7-12.

113) Ovchinnikov V.V. Self-propagating phase transformations in metastable media indused by ion bombardment / V.V. Ovchinnikov // Proceedings XVI International Simposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Moscow-St.Petersburg, 1994. - SPIE. - V. 2259. - P. 605-608.

114) Изменение дислокационной структуры и фазового состава сплава АМг6 при облучении ионами Ar<sup>+</sup> с энергией 40 кэВ / А.Р. Школьников, В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.С. Чемеринская, С.М. Можаровский, В.А. Козловских, Л.И. Кайгородова // Известия Томского политехнического университета. - 2005. - Т. 308. - №7. - С. 58-64.

115) Гапонцева Т.М. Исследование влияния температуры, степени деформации и воздействия ионов аргона на процессы формирования структуры молибдена / Т.М. Гапонцева, Л.М. Воронова, Т.И. Чащухина, Ф.Ф. Махинько, И.Ю. Романов, Н.В.Гущина, В.П. Пилюгин, В.В. Овчинников, М.В. Дегтярев // XIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14), 20-26 ноября 2013. С. 64-65.

116) Determination of Type and Degree of Long-Range Order in Fe-Si Steel by the Mossbauer Effect / I.N. Bogachev, S.D. Karakishev, V.S. Litvinov and V.V. Ovchinnikov // Phys. Stat. Sol. (A). - 1974. - V.24. - P. 661-665.

117) Bolduc M. Giant segregation effect and surface mechanical modification of aluminum alloys by oxygen plasma source ion implantation / M. Bolduc, D. Popovici, B. Terreault // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 2001. - V. 175-177. - C. 458-462.

118) Bourcier R.J. The mechanical response of aluminum implanted with oxygen ions / R.J. Bourcier, S.M. Myers, D.H. Polonis // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 1990. - V. 44. - № 3. - P. 278-288.

119) Ohira S. Oxygen irradiation effect in ion-beam synthesized aluminium oxide layers / S. Ohira, M. Iwaki // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. - 1990. - V. 46. - P. 413.

120) Structural investigation of AhO3 formed by ion implantation at various doses / Pawar P.S. [et al.] // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 1989. - V. 39. - № 1-4. - P. 670-674.

121) Blawert C. Plasma immersion ion implantation of pure aluminum at elevated temperatures / C. Blawert, B.L. Mordike // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 1997. - V. 127-128. - P. 873-878.

122) Файзрахманов И.А. Структура и прочность имплантированных ионами азота пленок алюминия / И.А. Файзрахманов, В.В. Базаров, И.Б. Хайбуллин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2001. - № 6. - С. 95-98.

123) Lucas S. Temperature and dose dependences of nitrogen implantation into aluminum / S. Lucas, G. Terwagne, F. Bodart // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 1990. - V. 50. - №14. -P. 401-405.

124) Cristobala M.J. Tribological behaviour of aluminium alloy AA7075 after ion implantation. / Cristobala M.J., Figueroa R., Mera L., Pena G. // Surface & Coatings Technology. - 2012. - V. 209. - P. 124-130.

125) Thibault S. Corrosion and wear mechanisms of aluminum alloys surface reinforced by multicharged N-implantation / Thibault S., Hugb E. //Applied Surface Science. - 2014. V. 310. - P. 311-316.

126) Углов В.В. Структурно-фазовые изменения в алюминии при имплантации ионов углерода / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.В. Ходасевич // Физика и химия обработки материалов. - 1999. - № 1. - С. 5-9.

127) Szcancoski J.C. Mechanical and tribological properties of carbon and nitrogen consecutive ion implantation into aluminium / J.C. Szcancoski, C.E. Foerster, F.C. Serbena, T. Fitz, U. KreiBig, E. Richter, W. Moller, C.M. Lepienski, P.C. Soares Jr., C.J. de M. Siqueira // Surface & Coatings Technology. - 2006. - V. 201. P. 1488-1494.

128) Foerster C.E. Carbon ion implantation into aluminium: Mechanical and tribological properties / C.E. Foerster, S.L.R. da Silva, T. Fitz, T. Dekorsy, Prokert F., Kreihig U., Richter E., Moller W., Lepienski C.M., C.J. de M. Siqueira // Surface & Coatings Technology. - 2006. - P. 5210-5219.

129) Фазовый и элементный состав алюминия, имплантированного ионами углерода и азота / В.В. Углов [и др.] // Перспективные материалы. - 2000. - № 4. - С. 69-74.

130) Структурно-фазовые изменения в алюминии при последовательной имплантации ионов углерода и азота / В.В. Углов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. - 2000. - № 2. - С. 12-16.

131) Влияние имплантации ионов бора на фазовый состав, микроструктуру и прочностные характеристики пленок алюминия / И.А. Файзрахманов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2003. - № 10. С. 109-112.

132) TEM and RBS channeling of nanosized bicrystalline (Pb, Cd) inclusions in Al made by sequential ion implantation / E. Johnoson [et al.] // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B. - 1997. - V. 127-128. - P. 727-733.

133) Модификация Al сплавов мощным ионным пучком при повышенных температурах / В.С. Ковивчак [и др.] // Физика и химия обработки материалов. - 2004. - № 1. - С. 28-30.

134) Анищик В.М. Влияние высокоэнергетических ионов неона на структуру сплава алюминий-марганец / В.М. Анищик, Л.А. Васильева, С.И. Жукова // ФХОМ. - 1998. - № 1. С. 5-8.

135) Анищик В.М. Эволюция микроструктуры стареющих алюминиевых сплавов при высокоэнергетической ионной имплантации / В.М. Анищик, С.И. Жукова, Л.А. Васильева // Физика и химия обработки материалов. - 1998. - № 6. - С. 9-14.

136) Анищик В.М. Микротвердость сплавов системы алюминий-медьмагний, имплантированных высокоэнергетическими ионами криптона / В.М. Анищик, С.И. Жукова, Н.И. Поляк // Физика и химия обработки материалов. -1999. - № 6. - С. 9-12.

137) Поляк Н.И. Структурно фазовое состояние и микротвердость сплавов на основе алюминия и меди, имплантированных высокоэнергетическими ионами криптона : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. - Минск, 2006. - 21 с.

138) Жукова С.И. Влияние высокоэнергетической ионной имплантации на структурнофазовую стабильность сплава Al-4 вес.% Cu / C.И. Жукова, Н.И. Поляк // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы V Международной конференции. - Минск, 2003. С. 148-150.

139) Mitsuda T. Hardening of Al-Cu-Mg alloy by energetic ion irradiation / T. Mitsuda, I. Kobayashi, S. Kosugi, Nao Fujita, Y. Saitoh, F. Hori, S. Semboshi, Y. Kaneno, K. Nishida, N. Soneda // Journal of Nuclear Materials. - 2011. - V. 408. P. 201-204.

140) Ueyama D. Effects of energetic heavy ion irradiation on hardness of Al-Mg-Si alloys / D. Ueyama, Y. Saitoh, Hori F. Y. Kaneno, K. Nishida, K. Dohi, N. Soneda, S. Semboshi, A. Iwase //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. - 2013. - V. 314. - P. 148111.

141) Способ получения листового проката из алюминиевых сплавов: патент РФ № 2363755 / Овчинников В.В., Гаврилов Н.В., Гущина Н.В., Школьников А.Р., Можаровский С.М., Филиппов А.В.; патентообладатель ОАО «КУМЗ»; пат. поверенный Янц В.К. № 2006143709/02; заявл. 08.12.2006; опубл. 10.08.2009 г. Бюл. № 22; приоритет 08.12.2006 г.

142) В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. (М.: Наука. 1976)

143) Г.Г. Самсонидзе, Ю.В. Трушин. Влияние преципитатов на эффективность поглощения точечных дефектов краевой дислокацией. Журнал технической физики. Т.58.№1 С.42-51 (1988)

144) В.И. Бойко, А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц. Успехи физических наук. Т.169.№11 С.1233-1271 (1999)

145) Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Плотников С.В. Радиационномеханические эффекты в твердых телах при облучении интенсивными импульсными электронными и ионными пучками/ВКТУ. – Усть-Каменогорск, 1998.-226 с.

146) В.И.Бойко, Ю.В.Данейкин, К.В.Юшицин. // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», №3, с.133–137, (2003).

147) V.I.Boyko, Yu.V.Daneykin, A.V.Khadkevich, K.V.Yushitsin. // Mathematics and mechanics. Physics, v. 310, № 2, p. 82–87, (2006).

148) В.И.Бойко, В.М.Быстрицкий, С.Н.Волков и др. // т. 15, №11, с. 1337-1341, (1989).

149) Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

150) Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. –М.: Наука, 1968. – 686 с.

151) Zhu X.P., Zhang F.G., Tang Y., Xin J.P, Lei M.K.Dynamic response of metals under high-intensity pulsed ion beam irradiation for surface modification, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B 272 (2012) 454-457.

152) M.K. Lei, X.P. Zhu, C. Liu, J.P. Xin, X.G. Han, P. Li, Z.H. Dong, X. Wang, S.M. Miao, Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng. 131 (2009) 031013.

153) Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.

154) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».

155) ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.

156) Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ P12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность
## Приложение А





Формат	Зона Поз		Обозн	ачен	ue	Наименован	ue	Кол.	Приме- чание
						<u>Документа</u>	<u>ция</u>		
		ΦЮΡΑ	A.14.C	94.02	.133.СБ	<u>Сборочный че</u>	<u>отеж</u>	1	
<u>A3</u>									
						Детали			
	1	ΦЮΓ	PA.140	402.	133.001	Газовый разря	Эник	1	
	2	е ФЮF	PA.140	402.	133.002	Делитель напря	жения	1	
	3	з ФЮF	PA.140	402.1	33.003	ДФЛ		1	
	4	¢ ФЮF	PA.140	402.1	33.004	Газовый разря	Эник	1	
	5	<sub>5</sub> ФЮР	PA.140	402.	133.005	Делитель напря.	жения	1	
	6	ο ΦЮF	PA.140	402.1	133.006	Пояс Роговско	090	1	
	7	́ФЮF	PA.140	402.1	33.007	Магнитоизолирое	занный	1	
						диод			
	8	<sup>3</sup> ΦЮF	PA.140	402.1	33.008	Вакуумная кам	ера	1	
	g	ΦЮΡ	A.140	402.1	33.009	Мишенный уз	ел	1	
	1	ФЮРА.140402.133.010		Вакуумная система		1			
	1	ФЮРА.140402.133.011		Генератор импульсных		1			
				напряжений					
	1	ФЮРА.140402.133.012		Система газоподачи		1			
Изм	Пист	No dorum	Πολη	Пата		ФЮРА.14.04.0	2.133 C	Сп	
Разраб. Пи		пч₂ оокум. Пименов Э.Ю.	1000.	-junia			Лит.	Лист	Листов
Пров.		Данейкин Ю.В.			Ускоритель			1	
Н.кс	онтр.				7	ЕМП-4М	K	ППУ Ф афедра	IИ ФЭУ MA5B
Уте	3.	Долматов О.Ю					I ''	Jynna Ur	סטואר

# Приложение Б

(обязательное)

Section 2

## Generation of Mechanical Waves in Metals under the High Power Ion Beam Irradiation

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Пименов Эдуард Юрьевич		

Консультант кафедры ФЭУ ФТИ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший				
преподаватель кафедры	Семёнов А.О.			
ФЭУ ФТИ				

## Консультант – лингвист кафедры ИЯ ФТИ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ИЯ ФТИ	Кабрышева О.П.			

# Content

Abstract	113
Introduction	
1 Model of elasto-plastic medium	116
1.1 Motion equations	117
1.2 Components of stress tensor deviator	118
1.3 Condition of the Von Mises plastic flow	119
1.4 State equations	119
1.5 Initial and boundary conditions	120
2 Results of numerical simulation and their discussion	120
2.1 Thermoelastic generation mechanism	122
2.2 Ablation mechanism of generation	127
Conclusions	131
References	

### Abstract

Graduate qualification work 108 p., 22 figures, 16 tables, 156 references, 2 appendices.

Keywords: pulsed beam of charged particles; target; structural aluminum; plasma formation; modification; ablation; blast wave; powerful ion beam; shock wave perturbation; impulse of mechanical loads; financial management; social responsibility.

The target of this research is a system consisting of a powerful ion beam and metal, with energy varying in the broad range of power density from  $10^7$  to  $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>.

The aim of this work is to determine characteristic features of shock wave perturbation in the "PIB - metal" system and to find interconnections between the parameters of the intensive ion beam and its modifying effect.

During the research, hydrodynamic codes were studied, which implement a model of elastic-plastic medium, topical literature was studied, a computational experiment was conducted for effect of ion beam on an aluminum target, shock wave perturbation generation modes were found and studied, characteristic features of mechanical loads impulses were studied, as well as influence of the intensive ion beam composition onto its shock wave characteristics. Modifying effects were determined. A calculation was performed to assess the cost of the graduate qualification work implementation, resource efficiency of a selected technical method was estimated, all the safety requirements were met during preparation of this work.

The research found the following shock wave generating modes: ablation, thermoelastic and transitional. Shock wave parameters leading to a target modification were found. It was found, that there is a possibility to form both bipolar and unipolar structure of the mechanical perturbation impulse. Boundaries of the beam parameters were found, where the bipolar perturbation at the vacuum stage has an amplitude exceeding the yield point by modulus. A possibility of slabbing action on the front side of the bombarded target was found in this field.

Degree of implementation: high, the project may be used right now, concurrently with continuing research.

Area of application: modification of structural metals, prediction of effects in metals subjected to PIB.

The work has high economic viability.

## Introduction

Modern systems of pulse beam generation of charged particles permit of production of concentrated energy flux in the wide range of intensities  $W=10^5...10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>, at pulse duration  $10^{-8}...10^{-6}$  sec. Such a wide range of energy impact defines the excitation within the target volume of different physical phenomena and, consequently, the variety of resultant effects developed both at separate processes and their superposition. These processes could be used for solution of a great number of scientific and theoretical problems.

Intermediate power density range  $10^7...10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> is characterised by large quantity of excited processes (high-velocity heating, phase transitions, plasma formation, ablation, generation of acoustic and shock waves and others), parallel occurrence of which determines technological possibilities for application of high power ion beams (HPIB). Micro- and nanosecond duration of action and nonlinearity relative to the radiation conditions makes hard-to-reach for investigation of fast phase transformation experimentally. Existing experimental studies [1] give integral picture of «HPIB – metal» system and, consequently, are directed at final result of action. In general, detailed research in dynamics of real physical system is possible only in the course of numerical experiment.

A number of investigations are devoted to the questions of shock-wave excitement generation in metals under the HPIB influence [1–6]. In the range of intensities  $10^7...10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> in «HPIB – metal» system the thermoelastic and shot loading mechanisms occur simultaneously. Separate examination of each mechanism is suitable only for qualitative investigation. Revealing detailed cause-effect connections (between HPIB parameters influencing metal and result of this influence expressed in deformation, dissipation processes, etc) requires the research in dissipation processes of shock-wave excitation and regularities of its transformation into acoustic ones. Development of mechanical stress pulse is in many ways conditioned by the regularities of its amplitude and spatial-time parameter formation at the stage of HPIB interaction with target. Hence, determination of topographical

peculiarities in shock-wave excitation and its maximum amplitude parameters by the moment of stopping HPIB action as well as determination of their interconnections with beam parameters is an actual problem.

### 1 Model of elasto-plastic medium

Solution of the problem posed has been made using authoring hydrodynamic codes presenting a generalized model of elasto-plastic medium under powerful pulse action [7]. The model is based on the Lagrange formalism for description of continuum behaviour. When using the Lagrange coordinates independent on time for description of medium motion, substantial derivatives coincide with partial ones. Partial derivatives are determined for each Lagrange particle, for this purpose it is necessary to know their current Euler coordinates.

Conservation laws, kinematical and physical relations for compressible elasto-plastic medium in the Lagrange form for cylindrical coordinate system r, z,  $\theta$  can be presented as:

#### **1.1 Motion equations**

$$a_{z} = \frac{\partial v_{z}}{\partial t} = V \left[ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\alpha}{r} \sigma_{zr} \right]$$
(1)

$$a_{r} = \frac{\partial v_{r}}{\partial t} = V \left[ \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{\alpha}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) \right],$$
(2)

where  $\sigma_{zz} = S_{zz} - p$ ;  $\sigma_{rr} = S_{rr} - p$ ;  $\sigma_{\theta\theta} = S_{\theta\theta} - p$ ; are combined stresses expressed by constituents of hydrostatic pressure tensor and constituents of stress tensor deviator;  $\sigma_{zr} = S_{zr}$  is the shearing stress;  $v_z$ ,  $v_r$  are the components of velocity vector in axial and radial directions, respectively;  $V = \rho_0 / \rho$  is the specific volume of Lagrange particle;  $\rho_0$ ,  $\rho$  are the initial and current densities of medium material; p is the hydrostatic pressure;  $\alpha$  is the balance factor of the problem ( $\alpha = 0$  in flat,  $\alpha = 1$  in cylindrical case) [12].

Continuity equation

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} = V \left[ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\alpha}{r} v_r \right].$$
(3)

Energy equation

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial E}{\partial t} = -p \frac{\partial V}{\partial t} + V \left[ S_{zz} \dot{\varepsilon}_{zz} + S_{rr} \dot{\varepsilon}_{rr} + S_{\theta\theta} \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} + S_{zr} \dot{\varepsilon}_{zr} \right] + QV , \qquad (4)$$

where *E* is the specific internal energy referred to a unit of initial volume; *Q* is the function of energy source;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  are the constituents of deformation rate tensor:

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial \upsilon_z}{\partial z}, \qquad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r} \,, \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \alpha \frac{\upsilon_r}{r} = \left[\frac{\dot{V}}{V} - \left(\dot{\varepsilon}_{zz} + \dot{\varepsilon}_{rr}\right)\right],\tag{7}$$

$$\dot{\varepsilon}_{zr} = \frac{\partial \upsilon_z}{\partial r} + \frac{\partial \upsilon_r}{\partial z}$$
(8)

Energy source function

$$Q = q_V(z,r) + \operatorname{div}\left(\lambda \left[\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha \frac{T}{r}\right]\right),\tag{9}$$

where  $q_v$  is the volume power of energy absorption,  $\lambda$  is the heatconductivity coefficient.

## 1.2 Components of stress tensor deviator

$$\frac{\partial S_{zz}}{\partial t} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{zz} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\right) + \delta_{zz},$$
(10)

$$\frac{\partial S_{rr}}{\partial t} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{rr} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\right) + \delta_{rr}, \qquad (11)$$

$$\frac{\partial S_{\theta\theta}}{\partial t} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} - \frac{1}{3}\frac{\dot{V}}{V}\right),\tag{12}$$

$$\frac{\partial S_{zr}}{\partial t} = G(\dot{\varepsilon}_{zr}) + \delta_{zr}.$$
(13)

where G = G(p,T) is the shear module,  $\delta_{ij}$  is the correction including increase in stresses at turn of medium element as a single whole.

$$\delta_{zz} = -\delta_{rr} = S_{zr} \left( \frac{\partial \upsilon_z}{\partial r} - \frac{\partial \upsilon_r}{\partial z} \right), \ \delta_{zr} = \frac{1}{2} \left( S_{zz} - S_{rr} \right) \left( \frac{\partial \upsilon_r}{\partial z} - \frac{\partial \upsilon_z}{\partial r} \right).$$

### 1.3 Condition of the Von Mises plastic flow

In chosen coordinate system the following equality is true

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = S_{zz}^2 + S_{rr}^2 + S_{\theta\theta}^2 + 2S_{zr}^2, \qquad (14)$$

where  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  are the main deviation stresses, consequently, The Mises flow condition has the view:

$$f = S_{zz}^{2} + S_{rr}^{2} + S_{\theta\theta}^{2} + 2S_{zr}^{2} \le \frac{2}{3\sigma_{T}^{2}},$$
(15)

here  $\sigma_T(p,T)$  is the dynamic limit of target material flow. If  $f > \frac{2}{3\sigma_T^2}$ , it is necessary to correct the values of deviation component by means of reduction of stresses in flow circle. For this purpose each of them is multiplied by the coefficient

$$S_{ij}' = \sqrt{\frac{2}{3f}} \sigma_T S_{ij} \,. \tag{16}$$

The  $S'_{ij}$  values corrected in such a way are used in integration of initial equation set. Such a stress reduction influences only the plastic part of stress and is equivalent to the use of complete relations for the Prandtl-Reuss theory of plastic flow at  $\sigma_i = \sigma_T$  [9].

#### **1.4 State equations**

$$p = p(\rho, E), \tag{17}$$

Hydrostatic pressure p as well as specific internal energy  $\varepsilon$  is divided into elastic and thermal constituents. The first  $p_s$ ,  $\varepsilon_s$  are exclusively connected with the forces of interatomic interaction and do not depend on temperature. The second  $p_T$ ,  $\varepsilon_T$  are conditioned by thermal atom motion and are functions of *T* temperature and  $\rho$ density:

$$p(\rho,T) = p_s(\rho) + p_T(\rho,T), \qquad (18)$$

$$\varepsilon(\rho,T) = \varepsilon_s(\rho) + \varepsilon_T(\rho,T). \tag{19}$$

Such an approach allows us to take into account overcoming the forces of interatomic interaction at substance expansion and phase transitions. Elastic and thermal constituents are determined by the wide-range state equation [10].

#### 1.5 Initial and boundary conditions

Under normal conditions continuum is in unperturbed stationary state and the energetic criteria for stable equilibrium state is to be fulfilled – potential energy is minimal. This principle is used as a basis for specification of initial and boundary conditions of our model. At the initial moment of time absorbing substance is in unperturbed state. Lagrange individual particles are at rest, i.e.  $v_z = v_r = 0$ . Deformations and stresses are absent, deviator components of stress tensor and deformation tensor are equal to zero ( $\varepsilon_{ij} = S_{ij} = 0$ ). The initial thermodynamic state is uniquely defined by the initial temperature. When introduced energy into the system the substance undergoes heat expansion and tends to new stationary state. Introduced energy is transformed into kinetic one of expanding substance, into thermal and elastic constituents of internal energy. In terms of our model new stationary state corresponds to minimum of complete internal energy, but parameters in the minimum point dictates the boundary conditions («substance – vacuum» boundary). In this case total pressure at the boundary is equal to zero, but density, temperature, internal energy and velocity of boundary motion are defined by the substance adiabatic expansion. Such an approach permits for more correct determination of all state parameters in fictitious cell.

#### 2 Results of numerical simulation and their discussion



Figure 1 – Amplitude-time pulse sweep of accelerating voltage and ion current density at output of generation unit

In the course of numerical experiments the processes of pulse formation of mechanical excitation generated under the HPIB influence in metal plate at power density  $10^7...10^9$  W/cm<sup>2</sup> have been studied. The latter varied with change of ion current density at fixed amplitude values of accelerating voltage *U*=660 kV and beam duration  $\tau$ =120 nsec. The forma of accelerating voltage pulses and current density were set according to the real parameters obtained in «VERA» accelerator (Fig. 1) [11]. The beams of different component composition (partial amount of carbon ions and protons) were considered.

In Figure 2 the characteristic pulse of mechanical excitation formed in the aluminium target by proton-carbon beam (60 % of protons, 40 % of carbon ions) of 8,43·10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> power density is presented. In elasto-plastic medium pulse of total pressure has complex structure. At amplitudes exceeding the metal flow limits  $\sigma_s$ , stable sequence of elastic and plastic wave is formed [12]. In the region of unloading appearance of elasto-plastic properties, interchange of elastic and plastic unloading waves spreading with different velocities (at pulse amplitude values of total pressure exceeding  $2\sigma_s$ ) is observed [13]. Rise-up portion of elasto-plastic pulse is a shock one. Unloading of substance follows the laws of adiabatic expansion. Besides, in the rise-up portion there is a convex region conditioned by the recoil momentum from hard (carbon) component of beam.



induced by HPIB of power density 8,45 · 10<sup>8</sup> W/cm<sup>2</sup> in aluminium target by the moment of current pulse completion.



In study of mechanisms of pulse generation for mechanical stresses (for example [1]) the two items are distinguished as the main ones: thermoelastic determined by intensive heat expansion of energy-release region and ablation (with flash surface evaporation due to intensive heating). In Figure 2 a clearly defined formation of thermoelastic excitation proceeding elasto-plastic wave is observed. The latter is conditioned by ablation mechanism. When spreading deep into the target amplitude of mechanical excitation pulse decreases intensively (Figure 3), which is connected to a great extent with non-hydrodynamic character of attenuation, when elastic dumping wave «overtakes» plastic impact front [14]. In studying the influence of beam power density on regularities of generation mechanisms maximum amplitude values of total pressure in mechanical loading pulse achieved, as a rule, by the moment of current pulse completion have been considered.

## 2.1 Thermoelastic generation mechanism

In Figure 4 the dependencies of maximal amplitude in mechanical excitation pulse on ion current density are presented for different component composition of beam. At the values of current densities  $1,35 \cdot 10^8$  W/cm<sup>2</sup> for proton and  $6,75 \cdot 10^7$ 

W/cm<sup>2</sup> for proton-carbon beam of «VERA» accelerator «switching on» the ablation mechanism of pulse generation is observed. Consequently, before the power densities mentioned only thermoelastic mechanism is realised.





Figure 4 – Dependence of the maximal amplitude in mechanical excitation pulse on the ion current density are presented for different component composition of beam on aluminum target.

Figure 5 – The dependence of magnitude of recorded stress waves on the ion current density in the range of 200–350 A/cm<sup>2</sup> on titanium target [6].

Figure 5 illustrates dependence of maximum amplitude of signals with PZT piezoelectric transducer recorded in the experiments on treatment of titanium targets HPIB [6]. Here dependence of maximum amplitude of signal on the initial stage as well as in numerical experiment increases in linear and at a certain moment the speed of amplitude increase rises sharply which indicates the switch of the mechanisms of the generation of mechanical waves. Amplitude values of voltage graded by pressure with PZT (piezoelectric transducer) [6] coincide on the order of magnitude with the values obtained in numerical experiment 10<sup>8</sup> dyn/cm<sup>2</sup>.

In realisation of thermoelastic generation mechanism the dependence of excitation amplitude on ion current density is linear [1]. Pulses generated by thermoelastic mechanism do not exceed the limits of metal fluidity in amplitude. In this case the main processes defining modification of metal properties at the depth exceeding energy-release region are those of temperature field relaxation. Presence of carbon component in the beam results in change of amplitude parameters of thermoelastic excitation. Wave mechanical excitation is generated near the irradiated surface mainly due to pressure gradient at the boundary of energy-release region. Presence of carbon component changes the energy-release profile (Figure 6) and, consequently, gradients of total pressure in the given region. Redistribution of absorbed energy in less deep target surface layers defines earlier (by ion current density) formation of plasma flame and, consequently, earlier «switching on» of ablation mechanism.



Figure 6 – Fields of specific absorbed energy per energy pulse duration from 1) proton; 2) proton-carbon beam of «VERA» accelerator

In Figure 7, 8 dynamics of stress field generated in irradiated surface in a time of HPIB action with current density  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> is presented. Beam absorbed energy increases thermal constituent of substance internal energy  $\varepsilon_r$ , which is indispensably accompanied by local growth of pressure heat component  $p_T$ . In the process of thermal target substance expansion specific volume increases, this defines the growth of elastic pressure component negative in sign  $p_s$ . In this case thermal internal energy is transformed into kinetic energy of expanding substance and elastic constituent of internal energy. Rate of power supply and that of substance expansion are so that the growth of thermal pressure component  $p_T$  is not compensated by the growth of negative elastic component  $p_s$ . In one of our papers [8] the mechanism of dumping pulse generation spread deep into the target is theoretically justified. It has been justified by rapid growth (in comparison with thermal pressure constituent) axial component of stress deviator. In the given case this mechanism are not realized, which is explained by additional account of temperature dependence for elastic properties of metal. Thus, at the boundary of energy-release region compression pulse is generated.



Figure 7 – Dynamics of axial stress component (with reversed sign) on HPIB axis at the initial interaction stage



completion





Figure 9 – Stress waves for the titanium targets of 3 mm thickness irradiated at the different ion current densities of 200–400 A/cm<sup>2</sup>, respectively [6].

Figure 10 -Stress wave for aluminum target irradiated at ion current density  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> in the moment of current pulse completion (t=150 ns)

At the pulse exit from interaction zone relaxation of shear stress takes place and «double-humped» compression wave is generated. This is the effect of elastoplastic substance properties and it appears in the case when limit of material fluidity is achieved as a result of substance heating in the zone of energy production, in this case sound speed changes for depression wave step-wise, resulting in repeated stress relaxation and generation of the second compression pulse. In [15] in the course of mathematical modelling in impact on HPIB aluminium plate of rectangular shape (of  $(3...4) \cdot 10^7$  W/cm<sup>2</sup> power density) probability of formation of such a twowave shape has been stated. The revealed effect has a stable tendency for appearance and is observed in numerical experiments while varying ion type and energy as well as beam current density. However, at significant deviation from the mentioned density range of summary energy production the two-wave structure does not appear. In our numerical experiments the given effect is present even in the case when ablation mechanism becomes the main one. Such a result is obtained in modelling of real beam impact, in pulse sweep of accelerating voltage and current of which there is a long phase of parameter growth. Stress relaxation processes conditioned by metal fluidity occur at the initial stage of interaction, when maximal amplitude parameters

have not been achieved yet, but ablation mechanism has not «switched on» yet. The same effect can be observed in nature experiments on treatment of titanium plates on accelerator TEMP-6 [6], which also has lengthy front of pulse increase of accelerating voltage and ion current. Identity of profiles of mechanical waves is observed when comparing the pulses measured experimentally (Figure 9, [6]) and those obtained by calculation (Figure 10). However in work [6] authors connect such behavior with the beginning of the realization of ablation mechanism; the peculiarities of the process are described later.

By the moment of time 25 nsec from the beginning of interaction at the boundary of local energy-release region the melting point is achieved. Energy consumption for the «solid – melt» phase transition results in decrease of growth rate for thermal pressure constituent outside the pulse generated at the initial stage of interaction. Relaxation of shear stresses in liquid phase as well as increase in absolute value of elastic pressure constituent  $p_s$  owing to volume expansion conditions formation of negative phase in mechanical stress pulse. By the moment of current pulse completion the generated pulse is of bipolar structure. Duration of generated bipolar pulse amounts  $\tau \approx 120$  nsec that corresponds to duration of HPIB action on target. The given fact confirms weak influence of heat conductivity on excitation generation by pulse HPIB [16].

After current pulse completion the generated pulse of mechanical stresses moves deep into the target with longitudinal sound speed. Further processes are characterised by relaxation of temperature field.

## 2.2 Ablation mechanism of generation

It is seen in Figure 4 that increase in density of ion current results in discontinuous change in dependence of pulse amplitude of mechanical stresses on ion current density. In case of large densities of absorbed energy, when the evaporation processes in target substance occur, the processes responsible for pulse disturbance excitation change too. In increasing current density saturation of amplitude values for

mechanical stress pulse is observed. The given fact is explained by influence of beam particle screening by plasma flame [17]. Intensive plasma yield leads to the case when part of delivered energy by beam is absorbed by gas-plasma flame.

In Figure 11 changes in maximal values of total pressure in mechanical excitation pulse in time are presented for proton and proton-carbon beam of «VERA» accelerator. It follows from the analysis of the results obtained that realisation of thermoelastic mechanism (region 1 in Figure 11) always proceeds ablation one independently of ion current density (in the considered range of power densities), the generation mechanisms being divided in time. Ablation mechanism «is switched on» by jump at appearance of plasma flame on the target surface, which is characterised by sharp growth of amplitude valued for pressure pulse.



Figure 11 – Dynamic of changes of the maximal amplitude values of the total pressure in mechanical excitation pulse in time for a) proton and b) proton-carbon (60% - protons, 40% - carbon ions) beam of the accelerator «VERA».

As a result of numerical experiments it is stated that two serial recoil momentums are formed in presence of carbon component in the beam. Plasma yield starts when sublimation energy on the surface in thermalization region of carbon component is achieved. Formation of gas-plasma phase in the region of HPIB proton component thermalization causes generation of the second, more in amplitude recoil momentum. Such a processes sequence of plasma yield in irradiated volume results in appearance of two fronts in plastic compression pulse (Figure 2). Difference of recoil momentum amplitude parameters from various components is explained by the fact that formation of plasma crown on the surface prevents from plasma spread in deep layers of target.



Figure12 – The dependence of pulse duration of mechanical excitation on ion current density

The process of plasma yield leads to screening of deep target layers moving to the beam in the form of gas-plasma cloud. The main part of beam energy is absorbed by the flame, which conditions saturation of recoil momentum.

Thus, amplitude of generated recoil momentum is limited by screening processes. For example, at ion current density A/cm<sup>2</sup> the maximum amplitude of mechanical stress pulse is achieved in 40 nsec after the beginning of impact. The rest of beam energy is spent for «heating» gas-plasma flame.

In Figure 12 the dependence of pulse duration of mechanical stress on ion current density is presented. «Switching on» of loading ablation mechanism defines the growth of pulse duration. Region of plasma yield undergoes expansion throughout the volume. At the «plasma-melt» boundary the conditions of pressure equality is met. Slow relaxation of pressure out of the front of generated compression

pulse at the «plasma-melt» boundary results in increase of pulse duration. At thermoelastic mechanism pulse duration is equal to that of beam. Realisation of generation ablation mechanism causes sufficient (by the order) increase in pulse duration and transition into microsecond range. In this case the dependence of pulse duration for mechanical stress on impact power density is of asymptotic character and tends to saturation. In the flame front at the «plasma-vacuum» boundary the pressure tents to zero, therefore, generated compression pulse is of unipolar structure.

### Conclusions

Under the influence of powerful ion beam on metallic target the linear growth of amplitude at mechanical excitation pulse (thermoelastic mechanism) is limited by «switching on» the ablation generation mechanism. Such pulses do not exceed the limits of metal flow in amplitude. Consequently, in this range of power density the main processes defining modification of metal properties at the depth exceeding the region of energy release are those of temperature field relaxation. Presence of hard component (carbon ions) in the beam results in decrease of amplitude parameters of mechanical excitation pulse as well as defines earlier (by ion current density) «switching on» of ablation mechanism of generation.

In compression pulse division of perturbation fronts formed by different mechanisms is observed. When moving the pulse deep into target the front of elastic precursor of ablation shock wave overtakes slowly the front of thermoelastic excitation. Under the action of proton-carbon beam two regions of plasma yield are formed in the target. This leads to spatial heterogeneity of formed plasma flame as well as to generation of two serial recoil momentums in time with formation of characteristic profile in plastic pulse. At thermoelastic mechanism the pulse duration equals to that of beam. Realisation of ablation mechanism causes sufficient growth of pulse duration which transfers from submicrosecond to microsecond range. Dependence of mechanical excitation pulse duration on power density is of asymptomatic character and tends to saturate.

## References

[1] V.I. Boyko, V.A. Skvortsov, V.E. Fortov, I.V. Shamanin Interaction of pulse beams of charges particles with a substance, Fizmatlit, Moscow (in Russian), 2003.

[2] A.N. Valyaev, A.D. Pogrebnyak, S.V. Plotnikov, Radiation mechanical effects in solids at radiation by intensive electron and ion beams, VKTU, Ust-Kamenogorsk (in Russian), 1998.

[3] V.I. Boyko, V.V. Evstigneev, Introduction to physics of charged particle high-intensity beam interaction with substance, Energoatomizdat, Moscow (in Russian), 1988.

[4] V.I.Boyko , A.N.Valyaev, A.D.Pogrebnyak , Modification of metallic materials by powerful pulse particle beams , Proc. of Phys. Sci. (in Russian). 169 (1999) 1243-1271.

[5] V.I. Boyko, Yu.V. Daneikin, K.V. Yushitsin, On the appearance of elastoplastic pulses generated by pulsed beams of charged particles on the back surface of a metallic target, Russian Metallurgy (in Russian). 3 (2001) 297-301

[6] X.P. Zhu, F.G. Zhang, Y. Tang, J.P. Xin, M.K. Lei, Dynamic response of metals under high-intensity pulsed ion beam irradiation for surface modification, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B 272 (2012) 454-457.

[7] D.E. Altukhov, V.I. Boyko, I.A. Tikhomirov, I.V. Shamanin, K.V. Yushitsin, Description of metal shock loading by pulse ion beam in combined elastohydrodynamic model, Phys. and Chem. Of Mater. Treament (in Russian).2 (1997) 5-11.

[8] V.I.Boyko, Yu.V. Daneykin, K.V. Yushitsin Numerical description of generation processes in wave excitation under the action of pulse energy flow to the metallic target, Questions of Nucl. Sci. (in Russian). 83 (2003) 133-137.

[9] B.L. Glushak, V.F. Kuropatenko, S.A. Novikov, Research in strength of materials at dynamic loads. Nauka, Novosibirsk (in Russian), 1992.

[10] Y. Daneykin, V. Boiko, K. Yushitsin, Modeling of the system "Concentrated stream of energy - metal" dynamics. Equation of state, Proc. of the7<sup>th</sup> Int.Forum on Strategic Technology, IFOST, IEEE, Tomsk, 2012.

[11] V.I. Boyko, V.M. Bystritskiy, S.N. Volkov, Generation and focusing of powerful ion beam in magneto-isolated diode, Phys. of Plasma (in Russian). 15, 11 (1989) 1337-1341.

[12] Ya.B. Zeldovich, Yu.P. Raizer, Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena, Nauka, Moscow, 1968.

[13] G.I. Kyanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Fortov, Shock-wave phenomena in condensed madia, Yanus-K, Moscow, 1996.

[14] M.L. Wilkins, Calculation of elasto-plastic flows, in S.S. Grigoryan, Yu.D. Shmyglevski, Calculation methods in hydrodynamics (Ed), Mir, Moscow, 1964. pp.212-263.

[15] A.V. Barsukov, A.V. Moroz, V.A. Skvortsov, Numerical study of compression wave in elastoplastic media by ion pulse beam, Investigation of Substances Properties under Extreme Cond. (in Russian). (1990) 175-181.

[16] N.I. Zalyubovskiy, A.I. Kalinichenko, V.T. Lazurik, Introduction to radiation acoustics. Vishchaya Shkola, Kharkov (in Russian), 1986.

[17] D.E. Altukhov, V.I. Boyko, I.V. Shamanin, Dynamics of formation, parameters and structure of gas-plasma flame formed under the action of powerful pulse beam to the metal, Therm. Phys. of High Temper. (in Russian). 34 (1996) 341-348.