

Тимофеев Иван Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОМЕТЕОРИТНЫХ ПОТОКОВ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ**

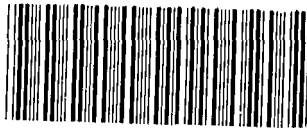
Специальность 01.04.21– лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

11 МАЯ 2016

Автор:



006649525

Москва – 2016

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (государственном университете).

Научный доктор физико–математических наук, профессор
руководитель: **Гольцов Александр Юрьевич**
начальник отдела оптических исследований
ГНЦ РФ Троицкого института инновационных
и термоядерных исследований

Официальные доктор физико–математических наук
оппоненты: **Сатов Юрий Алексеевич**
ведущий научный сотрудник ускорительного центра
Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
ФГБУ ГНЦ РФ Института теоретической и
экспериментальной физики

кандидат технических наук
Романов Игорь Владимирович
старший научный сотрудник лаборатории диагностики плазмы
ФГБУ Физический институт им. П.Н. Лебедева

Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение
организация: науки Институт космических исследований РАН

Защита диссертации состоится 15 июня 2016 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании совета Д 212.130.0 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Адрес и контактный номер телефона: 115409, Москва, Каширское ш. 31 тел. 8(499)324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте НИЯУ МИФИ:
<http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан 28 сентября 2016 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.130.05, д.ф.-м.н.



Стариков Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия мощного лазерного излучения с многокомпонентными поликристаллическими мишенями. В результате работы установлены требования к толщинам мишеней из андезита и условиям их облучения, при выполнении которых может быть реализован источник для эффективного моделирования воздействия микрометеоритов с конструкционными материалами.

1. Актуальность темы.

В последние десятилетия происходит интенсивное развитие и разработка экспериментальных и расчетных методик моделирования микрометеоритного удара. Актуальность данного вопроса связана как с необходимостью обеспечения работоспособности оборудования космических аппаратов, так и с безопасностью космонавтов. Изучение химических и физических свойств космической пыли так же дает важную информацию о происхождении и эволюции межпланетной материи. Термин микрометеорит означает любые метеорные тела или частицы космической пыли, движущиеся в пределах Солнечной системы и обладающие массой менее 10^{-5} г [1]. Наибольшую опасность для космических аппаратов представляют микрометеориты имеющие скорость выше 1 км/с. В литературе [2] микрометеориты имеющие скорость выше 10 км/с принято называть сверхскоростными.

Вероятность столкновения космического аппарата с метеоритом зависит от распределения потоков метеоритов в пространстве. Обобщенные результаты всех работ подтверждают резкое убывание потока метеорных тел с ростом размеров и массы. В течении полета любых космических аппаратов происходят многократные столкновения с микрометеоритами [1]. Такие столкновения могут приводить к серьезным повреждениям обшивки, приборов и устройств, расположенных на внешней поверхности космических аппаратов. Таким образом, моделирование микрометеоритных потоков в земных условиях представляется необходимой задачей для исследования поведения конструкционных материалов при ударных воздействиях.

Отметим, что на момент написания работы в существующей литературе представлено большое количество работ по лазерному моделированию микрометеоритного удара с помощью ускорения металлических фольг. Непосредственное воздействие лазерного излучения на мишень для ускорения приводит к нагреву неиспаренной части мишени за счет быстрых электронов и рентгеновского излучения [3]. Это, в конечном счете, может изменить агрегатное состояние ускоренной части мишени. Таким образом, взаимодействие потока плазмы или пара не в состоянии моделировать ударный процесс на всех стадиях его развития.

Следует подчеркнуть, что по своему составу [4] микрометеориты, в основном, подразделяют на две группы: железные (основа из никеля и железа) и каменные (основу которых составляет окись кремния). Так же заметная доля микрометеоритов представлена «рыхлыми» объектами [1] со средней плотностью $\rho < 1 \text{ г/см}^3$. В работе [5] показано, что 51% метеоритов имеют плотность 0,37 г/см³, 45% - 2,8 г/см³, 4% 8 г/см³.

Таким образом, значительную часть микрометеоритов представляют собой каменные

пылинки, информация о лазерном моделировании удара которых слабо отображена в литературе. Поэтому представляется важным рассмотрение вопроса о лазерном моделировании подобных микрометеоритных ударов.

Цели и задачи исследования.

Учитывая изложенные выше факты целью диссертационной работы являлось исследование взаимодействия мощного лазерного излучения с многокомпонентными поликристаллическими породами и создание лазерно-плазменного источника частиц микронного размера и твердотельной плотности со скоростями, близкими к скоростям, имеющим место в микрометеоритных потоках. Для реализации цели исследования было необходимо решить целый ряд задач:

- создание лазерного диагностического комплекса для проведения исследований по моделированию микрометеоритного удара в широком диапазоне условий облучения мишеней;
- измерение температуры плазмы, создаваемой при воздействии лазерного излучения интенсивностью $10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² на многокомпонентные поликристаллические мишени;
- определение зависимости параметров кратеров образующихся при взаимодействии лазерного излучения с многокомпонентными поликристаллическими породами от условий облучения;
- изучение взаимодействия лазерного излучения с тонкими андезитовыми мишенями;
- определение оптимальных условий облучения многокомпонентных поликристаллических пород для создания источника частиц адекватно моделирующих микрометеоритный удар.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. На основе экспериментальных данных о температуре плазмы, образующейся при взаимодействии лазерного излучения интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² с андезитовыми мишенями, впервые обосновано применение стационарной аналитической модели сферического расширения плазмы для многокомпонентных поликристаллических пород.
2. Впервые получены экспериментальные данные о взаимодействии лазерного излучения интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² с тонкими андезитовыми мишенями: размеры образующихся кратеров, морфология напыления продуктов разлета плазменного факела и вещества из откольного кратера.
3. Предложена и экспериментально подтверждена модель генерации ударной волны при лазерном воздействии интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² на поликристаллические многокомпонентные породы.
4. Впервые показано, что при воздействии лазерного излучения интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² на многокомпонентные поликристаллические породы на тыльной

стороне мишеней образуются частицы микронного размера, которые по своему химическому составу, температуре, геометрическим размерам и скорости эквивалентны потоку микрометеоритов в космическом пространстве.

Практическая ценность работы.

1. Результаты модернизации лазерной системы «Сатурн» могут быть использованы для проектирования мощных лазерных систем пригодных для изучения взаимодействия лазерного излучения с многокомпонентными поликристаллическими породами.
2. Совокупность экспериментальных данных о параметрах плазменного факела согласуется с моделью П. Мора, что позволяет использовать её для достоверных оценок абляционного давления.
3. Экспериментально подтвержденная модель генерации ударных волн при лазерном воздействии интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ может в дальнейшем быть использована для более детальных расчетов по взаимодействию лазерного излучения с многокомпонентными поликристаллическими породами.
4. Проведенные комплексные исследования процессов взаимодействия лазерного излучения с мишенями из андезита показывают перспективность использования таких материалов для моделирования микрометеоритного удара.
5. Предложен новый подход к моделированию микрометеоритного удара, позволяющий получить потоки андезитовых осколков твердотельной плотности размером от 0.1 мкм до 50 мкм и скоростью порядка 10 км/с.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Созданный диагностический экспериментальный комплекс на базе лазерной установки «Сатурн» для исследований по моделированию микрометеоритного удара в широком диапазоне условий облучения мишеней.
2. Результаты экспериментов по облучению многокомпонентных поликристаллических пород и металлов. Измерения температуры плазмы, образующейся при воздействии на мишени лазерного излучения интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13} \text{ Вт/см}^2$. При облучении андезитовых мишеней интенсивностью $I = 4 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$, температура плазмы составляет $\sim 200 \text{ эВ}$.
3. Совокупность экспериментальных результатов по измерению температуры плазмы методом фильтров подтверждает стационарную аналитическую модель сферического расширения плазмы.
4. Результаты аналитических оценок размеров кратеров по модели генерации ударной волны при лазерном воздействии интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ на поликристаллические многокомпонентные породы и экспериментальные подтверждения. Получена оценка скорости ударной волны, возникающей в андезитовых мишенях, которая составила $\sim 5 \text{ км/с}$ при $I = 3.5 \cdot 10^{11} \text{ Вт/см}^2$.

5. Результаты комплексных исследований облучения тонких андезитовых мишеней. Экспериментально определена скорость разлета вещества с тыльной стороны мишени, которая составляет ~ 10 км/с при $I = 3.9 \cdot 10^{11}$ Вт/см². Вещество с тыльной стороны мишени представляет собой твердые осколки из андезита размером от 0,5 мкм до 50 мкм.
6. Воздействие лазерного излучения интенсивностью $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² на многокомпонентные поликристаллические породы позволяющие создать поток частиц моделирующих микрометеоритный удар.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на:

- European planetary Science Congress - Division for Planetary Science of the American Astronomical Society, Nantes, France, 2011;
- 54-я научная конференция МФТИ, Долгопрудный, 2011;
- Конференция-конкурс молодых Физиков, Москва, 2012;
- XVIII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, Russia, 2013;
- XXIX International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, Russia, 2014;
- 18th International School on Quantum Electronics, Sozopol, Bulgaria, 2014

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 3 статьи в рецензируемых журналах (список публикаций приведен в конце автореферата).

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 126 страницах, включая 70 рисунков и библиографию из 99 наименований.

Личный вклад автора состоит в формировании программы исследования, непосредственном проведении экспериментов, обработке и обсуждении результатов. В части расчетно-теоретических исследований вклад диссертанта состоял в сопоставлении результатов расчета с экспериментом, а также в проведении отдельных расчетов с использованием специализированных программ.

2. Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность и новизна, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации диссертационного материала. Описана структура диссертации и её содержание.

Первая глава содержит обзор литературы и посвящена взаимодействию лазерного излучения с веществом и различным особенностям лазерного моделирования микрометеоритного удара.

Особое внимание уделяется сверхскоростным ударам. Отмечено, что прямое воздействие лазерного излучения на вещество не в состоянии в точности отразить одновременно все характерные особенности ударных процессов. Приведен краткий обзор работ по лазерному моделированию микрометеоритного удара. Показана масштабность проблемы связанной с микрометеоритной опасностью. Обоснована необходимость моделирования в земных условиях потоков частиц идентичных микрометеоритам в космическом пространстве.

Во второй главе описан экспериментальный комплекс «Сатурн», представляющий собой мощную многокаскадную лазерную систему на Nd^{+3} -фосфатном стекле (см. рис. 1), энергокомплекс, вакуумную камеру взаимодействия и диагностический комплекс.

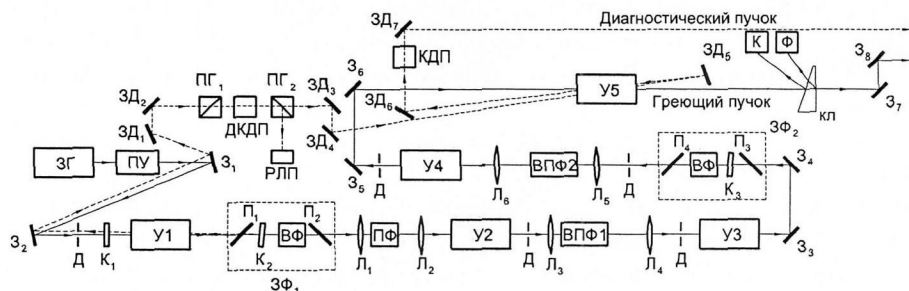


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы установки «САТУРН». Греющий пучок: ЗГ - задающий генератор; ПУ - предусилитель; З1-З8 - поворотные диэлектрические зеркала; Д - диафрагмы; К1 - кварцевая пластина (90°); ЗФ1 - затвор Фарадея на постоянном магните; П1-П4 - диэлектрические поляризаторы; К2-К3 - кварцевые пластины (45°); ВФ - магнитоактивное стекло; У1 - У5 - усилители диаметром 10, 20, 30, 45, 45 мм; Л1-Л6 - линзы пространственных фильтров; ПФ - воздушный пространственный фильтр; ВПФ1-ВПФ2 - вакуумные пространственные фильтры; ЗФ2 - импульсный затвор Фарадея; КЛ - оптический клин; К - калориметр; Ф - лавинный фотодиод. Диагностический пучок: ЗД1 - ЗД7 - поворотные диэлектрические зеркала; ПГ_{1,2} - призмы Глана; ДКДП - ячейка Поккельса; РЛП - разрядник с лазерным поджигом; КДП - преобразователь во вторую гармонику.

На выходе конечного усилителя формировался лазерный импульс энергией до 50 Дж при длительности 30 нс (полная ширина на полувысоте) с расходимостью $\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ рад. Длина волны излучения $\lambda = 1,054$ мкм. Диаметр пятна фокусировки D_L в экспериментах изменялся от 100 мкм до 350 мкм.

Диагностический комплекс установки «САТУРН», располагает широким набором рентгеновских, оптических и других оригинальных диагностических методик, позволяющих проводить экспериментальные исследования с высоким временным и пространственным разрешением.

В третьей главе проведен детальный анализ причин, влияющих на точность измерения температуры плазмы методом фильтров. Рассмотрены особенности применения программного продукта «XR» [6] для измерения температуры плазмы в экспериментах на установке «Сатурн». Приведены результаты рентгеновских измерений, полученных в экспериментах по взаимодействию лазерного излучения с многокомпонентными поликри-

сталлическими породами и металлами при интенсивностях на мишени в пределах $10^{10} - 10^{13}$ Вт/см². Экспериментально подтверждена упрощенная стационарная аналитическая модель сферического расширения плазмы [7] для многокомпонентных поликристаллических пород и металлов.

В параграфе 3.1 рассматриваются рентгеновские методики измерения температуры плазмы.

В п.3.1.1 представлен анализ причин, влияющих на точность измерения температуры плазмы методом фильтров.

В п.3.1.2 подробно рассматриваются вопросы применения программного продукта «XR» [6] для измерения температуры плазмы в экспериментах на установке «Сатурн».

В п.3.1.3 представлены сорбционные кривые для металлов с учетом и без учета рекомбинационного излучения плазмы. Показано, что в интервале от 200 эВ до 600 эВ не учет рекомбинационного спектра излучения Al плазмы приводит к погрешности в определении температуры менее 12%.

В параграфе 3.2 подробно рассматриваются вопросы применения модели П.Мора [7] для экспериментов на установке «САТУРН».

Параграф 3.3 посвящен сравнению экспериментально измеренной температуры плазмы с её расчетными значениями по модели П.Мора.

В п.3.3.1 представлены сорбционные кривые для многокомпонентных поликристаллических мишеней из андезита. Для расчета температуры плазмы, рассмотрено несколько упрощенных представлений вещества. Сорбционные кривые (см. рис. 2) строились для: SiO_2 - (1); вещества состоящего из SiO_2 (80% по массовой доле), Al_2O_3 (20%) - (2); вещества состоящего из SiO_2 (75%), Al_2O_3 (20%), Fe (5%) - (3).

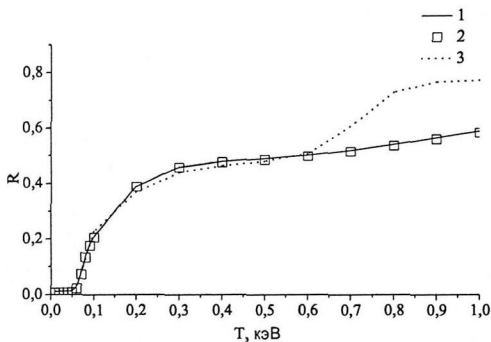


Рис. 2. Сорбционные кривые, построенные для разного представления андезита: 1. SiO_2 - сплошная линия, 2. вещество состоящее из SiO_2 (80% по массовой доле), Al_2O_3 (20%) - только квадраты, 3. вещество состоящее из SiO_2 (75%), Al_2O_3 (20%), Fe (5%) - пунктирная линия.

Из данных, приведенных на рис. 2 следует, что влияние примесей металлов при построении сорбционных кривых в диапазоне от 200 эВ до 400 эВ вносит погрешность не более 6%.

В п.3.3.2 приведены результаты измерений рентгеновского излучения плазмы, образующейся при облучении мишеней. Форма рентгеновского сигнала (измеренная рентгенов-

ским рип-диодом) практически идентична греющему пучку, а его длительность незначительно больше, что в диапазоне плотности мощности до 10^{13} Вт/см² согласуется с результатами многочисленных работ (см., например [8]). В разделе представлены сигналы, полученные с термопарных калориметров [9] при облучении мишеней из алюминия и андезита. При облучении мишени из Al при плотности мощности $I \sim 3,9 \cdot 10^{11}$ Вт/см² получена температура $T_e \sim 200$ эВ. Выполнена дополнительная проверка полученных данных с использованием в качестве детектора фотопленки УФ-4 [10]. Приводятся экспериментальные результаты измерений с камерой-обскурой, свидетельствующие о сферичности разлета плазмы.

П.3.3.3 посвящен анализу результатов температурных измерений для различных мишеней и сопоставления с моделью Мора. Показано, что измеренная температура плазмы для алюминиевых (см. рис. 3) и андезитовых (см. рис. 4) мишеней в пределах погрешности согласуется с результатами расчетов. Слабая зависимость температуры от компонентного состава плазмы при построении сорбционных кривых для получения температуры плазмы позволяет не учитывать, в пределах погрешности, неоднородность материала мишени.

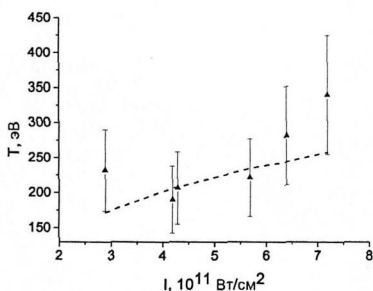
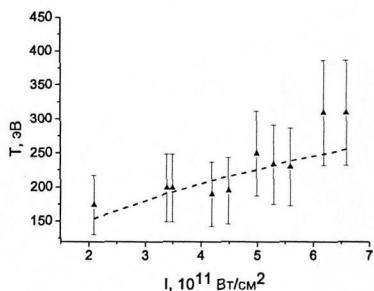


Рис. 3. Температура плазмы, образованной при облучении мишеней из Al. Треугольниками показаны экспериментальные данные, пунктирная линия - теоретический скейлинг П.Мора.

Рис. 4. Температура плазмы, образованной при облучении мишеней из андезита. Треугольниками показаны экспериментальные данные, пунктирная линия - теоретический скейлинг П.Мора.

В параграфе 3.4 представлены результаты теоретических оценок абляционного давления в рамках модели П.Мора. Показано, то скейлинги модели [7] дают оценку абляционного давления ~ 4 Мбар для интенсивности $I \sim 10^{13}$ Вт/см². Так же в параграфе описаны выводы к третьей главе работы.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований образования кратеров в многокомпонентных поликристаллических толстых мишенях (андезита) и алюминии под действием мощного лазерного импульса с интенсивностью $10^{12} - 10^{13}$ Вт/см². Показано, что полученные в эксперименте размеры кратеров согласуются с результатами оценок, основанных на модели трансформации энергии лазерного импульса в энергию ударной волны при абляционном процессе на поверхности мишени в режиме гидродинамического воздействия. Получена оценка скорости ударной волны при воздей-

ствии лазерного излучения на многокомпонентные поликристаллические породы.

В главе представлены экспериментальные результаты взаимодействия лазерного излучения с тонкими мишенями из поликристаллического андезита. Исследованы продукты разлета вещества андезитовой мишени из плазменного факела и из откольного кратера с тыльной поверхности мишени. Получена оценка скорости разлета вещества с тыльной стороны мишени.

В параграфе 4.1 описаны результаты экспериментального исследования кратеров образующихся при взаимодействии лазерного излучения с металлами и многокомпонентными поликристаллическими породами.

В параграфе 4.2 исследуются продукты разлета вещества из плазменного факела. Представлена характерная морфология осажденного материала, образующая неоднородную пленку, состоящую из отдельных капель и "жгутиков". Характерные размеры капель варьируются от 0.1 мкм (рис. 6) до 15–25 мкм (рис. 5).

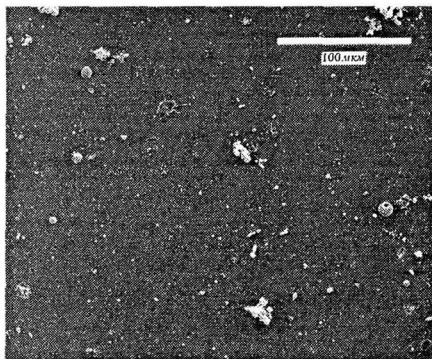


Рис. 5. Электронные микрофотографии конденсатной плёнки андезита. Увеличение: 1000; $D_L = 100$ мкм, $I = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см².

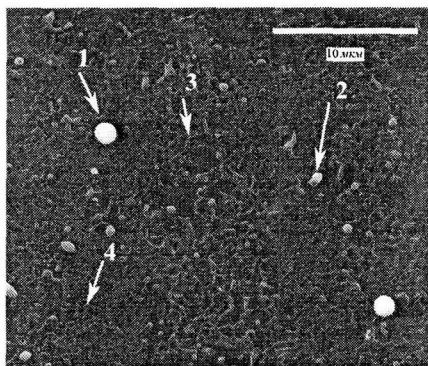


Рис. 6. Электронные микрофотографии конденсатной плёнки андезита. Увеличение: 10000; $D_L = 100$ мкм, $I = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см²; 1, 2 - пример капель, 3, 4 - пример "жгутиков".

В параграфе 4.3 подробно рассматривается упрощенная аналитическая модель генерации ударной волны при лазерном воздействии. Показано, что характеристики кратеров в исследованном диапазоне интенсивностей могут быть описаны аналитической теорией распространения в веществе ударной волны и абляционного разрушения мишени в гидродинамическом режиме [11].

На рис. 7-8 представлены рассчитанные зависимости характерных размеров кратера от интенсивности лазерного излучения в случае андезита (рис. 7) и алюминия (рис. 8).

Показано, что, не смотря на сильно упрощенные предположения, лежащие в основе теоретических оценок, для алюминиевой мишени расчетные величины диаметра и глубины кратера хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для андезита согласие несколько хуже. Возможной причиной этого является то, что, горные породы имеют значительную пористость. Однако учёт фактора пористости требует построения сложных

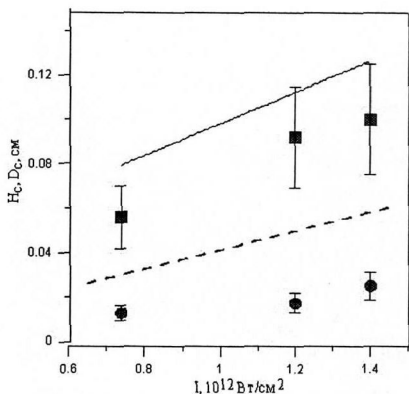


Рис. 7. Экспериментальные (•, ■) и расчётные (—, - -) зависимости глубины H_c (•, - -) и диаметра D_c (■, -) кратера в андезите от интенсивности лазерного излучения, $D_L = 0,035$ см.

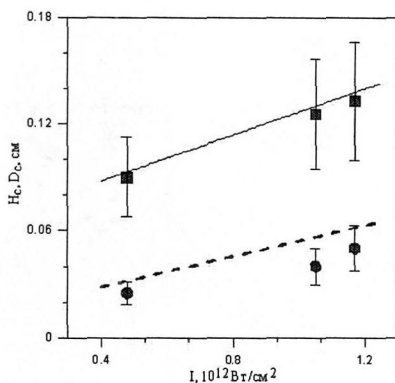


Рис. 8. Экспериментальные (•, ■) и расчётные (—, - -) зависимости глубины H_c (•, - -) и диаметра D_c (■, -) кратера в алюминии от интенсивности лазерного излучения, $D_L = 0,035$ см.

моделей среды и детальны численных расчётов.

В параграфе 4.4 представлена оценка скорости ударной волны при воздействии лазерного излучения на многокомпонентные поликристаллические мишени. Показано, что в экспериментах с андезитовыми мишенями толщиной порядка 2 см ударная волна затухает до выхода на свободную поверхность. Однако, если использовать тонкие мишени, то с учетом удвоения скорости вещества на свободной поверхности [12] в приближении сильной ударной волны, можно ожидать скорость разлета вещества порядка $\frac{4}{\gamma+1}W \sim 10$ км/с.

В параграфе 4.5 представлены результаты исследования взаимодействия лазерного излучения с тонкими андезитовыми мишенями толщиной от 250 до 700 мкм. В экспериментах установлено, что в зависимости от энергии лазерного излучения и толщины мишени возможны два характерных случая откола, а именно: с образованием и без образования сквозного канала. Канал, как правило, образовывался на мишенях толщиной < 350 мкм. При толщинах больше 400 мкм в подавляющем числе случаев канала не образуется.

В параграфе 4.6 детально описано исследование продуктов разлета вещества андезитовой мишени из плазменного факела и из откольного кратера. Отмечено, что характер напыления при разлете плазменного факела при переходе от толстых мишеней (~ 2 см) к тонким пластинкам (~ 400 мкм) не изменяется (см. рис. 5 - 6). В напылении присутствуют "капельки и жгуты".

Установлено что продукты разлета откольного кратера в тонких андезитовых мишенях представляют собой поток твердых частиц (см. рис. 9-10). Холодные андезитовые осколки (температура менее 1500° C) имеют размер от 0.5 мкм до 50 мкм. Химический состав андезита очень близок к составу многих метеоритов и марсианской пыли.

В параграфе 4.7 представлено экспериментальное исследование движения вещества

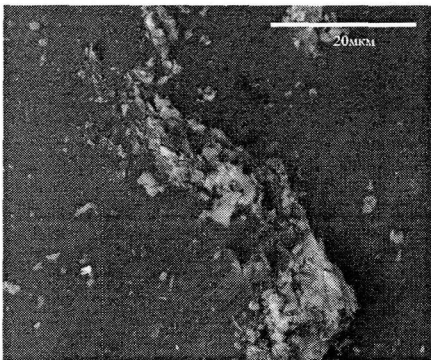


Рис. 9. Электронные микрофотографии напыления с тыльной стороны мишени. Увеличение: 5000; $D_L = 100$ мкм, $I = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см².

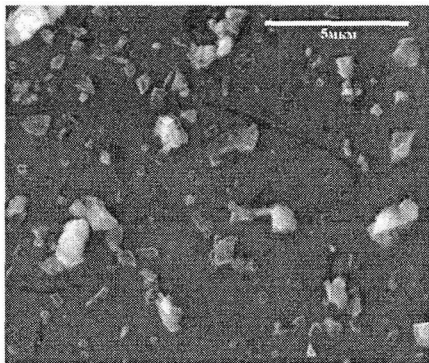


Рис. 10. Электронные микрофотографии напыления с тыльной стороны мишени. Увеличение: 20000; $D_L = 100$ мкм, $I = 5 \cdot 10^{12}$ Вт/см².

на тыльной поверхности мишени. Для определения момента начала движения использовался диагностический метод, основанный на измерении момента разрыва тонкой алюминиевой фольги, расположенной на тыльной поверхности мишени. Во всех случаях образования откола без сквозного канала измерена задержка между приходом греющего пучка на лицевую поверхность мишени и моментом разрыва фольги.

На рис. 11 представлена зависимость момента образования откола от толщины андезитовых мишеней. Уровень подводимой лазерной энергии постоянный и составляет ~ 8 Дж.

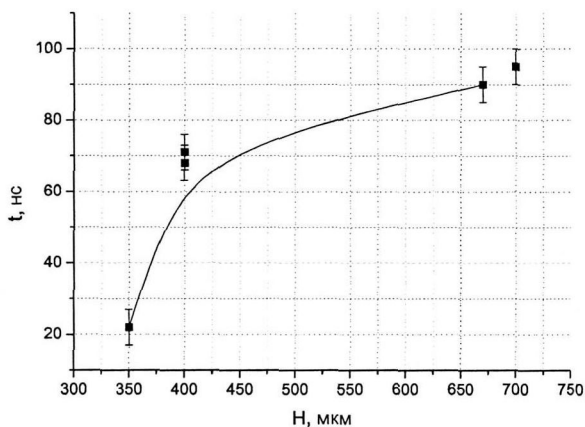


Рис. 11. Зависимость момента образования откола от толщины андезитовой мишени.

В дальнейшем полученные данные позволяют оценить скорость ударной волны и раз-

лета осколков из откольного кратера.

В параграфе 4.8 подробно описываются результаты измерения свечения с тыльной поверхности мишени. Обнаружено, что в случае образования откола со сквозным каналом с тыльной поверхности мишени регистрируется излучение (в видимом диапазоне) через 18 нс от прихода греющего импульса на лицевую поверхность мишени.

В параграфе 4.9 сформулированы выводы к четвертой главе работы. Получена оценка скорости разлета вещества с тыльной стороны мишеней со скоростями порядка 10 км/с.

В заключении подведены итоги выполненных исследований.

Основные результаты работы.

Основные научные и научно-практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Создан диагностический экспериментальный комплекс на базе лазерной установки «Сатурн» для исследований по моделированию микрометеоритного удара в широком диапазоне условий облучения мишеней ($\lambda = 1,054$ мкм, $E_L \sim 20 - 50$ Дж, $\tau = 30$ нс, $\theta \sim 1,5 \times 10^{-4}$ рад, D_L от 60 мкм до 350 мкм). Варьирование условий облучения мишеней позволяет проводить исследования в широком диапазоне плотности мощности на мишени $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ Вт/см².
2. Выполнены эксперименты по облучению многокомпонентных поликристаллических пород и металлов. Измерена температура плазмы, образующейся при взаимодействии лазерного излучения интенсивностью $10^{10} - 10^{13}$ Вт/см² с мишенями. Экспериментально подтверждена стационарная аналитическая модель сферического расширения плазмы.
3. Развита и экспериментально подтверждена упрощенная модель генерации ударной волны. Получена оценка скорости ударной волны, распространяющей в андезитовых мишенях, которая при $I \sim 3,5 \cdot 10^{11}$ Вт/см² составляет ~ 5 км/сек. Наличие откольного кратера, наблюдаемого в экспериментах с андезитовыми мишенями толщиной $\leq 0,7$ мм при указанных интенсивностях, свидетельствует о выходе ударной волны на тыльную поверхность мишени.
4. Установлено, что характер напыления на кремниевую подложку продуктов разлета вещества из плазменного факела при переходе от толстых (~ 1 см) андезитовых мишеней к тонким (400-700 мкм) не изменился. Анализ напыления показал, что в нем присутствует значительное количество "капель и жгутиков" различной формы с характерными размерами от 0,1 мкм до 25 мкм. Продукты разлета вещества с тыльной стороны тонких мишеней представляют собой твердые осколки из андезита размером от 0,5 мкм до 50 мкм.
5. Впервые показано, что при воздействии лазерного излучения умеренной интенсивности на многокомпонентные поликристаллические породы на тыльной стороне мишеней образуются частицы микронного размера, которые по своему химическому составу, температуре, геометрическим размерам и скорости эквивалентны потоку микрометеоритов в космическом пространстве.

6. Установлены требования к толщинам мишеней из андезита и условиям их облучения, при выполнении которых может быть реализован источник для эффективного моделирования воздействия микрометеоритов с конструкционными материалами.

Основные результаты изложены в работах:

1. *Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю., Леонов А.Г., Макаров К.Н., Родин А.В., Тимофеев И.С., Юфа В.Н.* Лазерное моделирование сверхскоростного удара микрочастиц о поверхность поликристаллической мишени (горной породы) // Исследовано в России.— 2012.— №042.— С. 574–578.
2. *Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю., Леонов А.Г., Макаров К.Н., Тимофеев И.С., Юфа В.Н.* Генерация ударных волн при взаимодействии мощного лазерного излучения с поликристаллическими мишенями // Вопросы атомной науки и техники— 2013.— №2.— С. 8–19.
3. *Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю., Леонов А.Г., Макаров К.Н., Родин А.В., Тимофеев И.С., Юфа В.Н.* Образование кратеров в многокомпонентных поликристаллических мишенях под действием мощного лазерного импульса // Труды МФТИ— 2013.— №1.— С. 175–183.
4. *Timofeev I.S., Burdonskiy I.N., Goltsov A.Yu., Leonov A.G., Makarov K.N., Yufa V.N.* The interaction of high-power laser emission with multicomponent polycrystalline rocks // Physics of Extreme States of Matter.— 2013.— P. 31–33.
5. *Timofeev I.S., Burdonskiy I.N., Goltsov A.Yu., Leonov A.G., Makarov K.N., Yufa V.N.* Spalls formation in thin polycrystalline targets under the action of the high-power laser pulse // Physics of Extreme States of Matter.— 2014.— P. 123–125.
6. *Timofeev I.S., Aleksandrov N.L., Burdonskiy I.N., Goltsov A.Yu., Makarov K.N., Putilin M.V., Yufa V.N., Leonov A.G.* Temperature measurement in plasma torch generated by moderate laser irradiation of multicomponent polycrystal rock surface // Laser Phys.— 2014.— v. 24, №12. — P. 126002.

Список цитируемой литературы:

- 1) *Вербицкий С.С., Иванов Г.И., Кленов Г.И.* Микрометеориты и Мегаметеориты. Физика взаимодействия с веществом. Методы исследования физических параметров и химического состава.— Черногловка: Академия наук СССР, 1986.
- 2) *Моногадзе Г.Г.* Плазма метеоритного удара и добиологическая эволюция.— М.: Физматлит, 2009.
- 3) *Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортвов В.Е.* Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях. // УФН. - 1984. - Т. 142. -С. 395–434.
- 4) *Днякова М.Н., Харитоновна В.Я., Явнель А.А.* Химический состав микрометеоритов.— М.: Наука, 1979.
- 5) *Zook D.E., Flaherty R.E., Kessler D.J.* Meteoroid impacts on the Gemini windows//Planet Space Sci.—1970.—v. 18.— P. 953–964.

- 6) *Гаврилов В.В., Торохова В.Н., Фасахов И.К.* Основные источники погрешности сорбционного метода и определение параметров электронной компоненты плазмы по ее непрерывному рентгеновскому излучению. // *Диагностика плазмы.* - 1986. - Т. 5. - С. 284–292.
- 7) *Mora P.* Theoretical model of absorption of laser light by a plasma//*Phys. Fluids.*—1982.— v. 25.— P. 1051–1056.
- 8) *Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В., Гольцов А.Ю.* Рентгеновское излучение плазменной короны в экспериментах по облучению фольг лазерным пучком // *Физика плазмы.* - 1987. - Т. 13, №7. -С. 819–825.
- 9) *Брюнеткин Б.А., Гладков В.Д., Копистко О.В.* Методы исследования спектральных и релаксационных характеристик атомов и ионов // *Сб. научн. Тр. ВНИИФТРИ.* - 1990. -С. 76–93.
- 10) *Бессараб А.А., Поспелова С.А., Токарев В.А.* Спектральная чувствительность фотопленки УФ-4 в области спектра 0.27-3 кэВ // *ПТЭ.* - 2000. - Т. 4. -С. 151–153.
- 11) *Гуськов С.Ю., Бородзюк С., Калал М.* Генерация ударных волн и образование кра-теров в твердом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса // *Квантовая электроника.* - 2004. - Т. 34. -С. 989–1003.
- 12) *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1968.

Подписано в печать: 08.04.2016

Заказ № 11312 Тираж - 90 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(977) 518-13-77 (499) 788-78-56

www.autoreferat.ru