

На правах рукописи

**Лебо Александра Ивановна**

**АНАЛИЗ ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ  
МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2014

**Работа выполнена** в Международном центре по информатике и электронике (ИнтерЭВМ) ЦИТИС

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Назаров Алексей Николаевич**

**Официальные оппоненты:** **Красюк Игорь Корнелиевич**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделом  
Института общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН

**Болдарев Алексей Сергеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
заведующий сектором Института  
прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН

**Ведущая организация:** Международный учебно-научный  
лазерный центр МГУ  
им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 13 ноября 2014 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.03 при Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН по адресу 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМ им. Келдыша РАН и на сайте [www.keldysh.ru](http://www.keldysh.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Н.В. Змитренко

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

В настоящей диссертации представлены результаты математического моделирования физических явлений в лазерной плазме, возникающей при воздействии мощных лазерных импульсов на конденсированные мишени. Разработаны физико-математические модели и созданы новые версии программ «Atlant\_C\_turb» и «Atlant\_Sp\_turb», позволяющие проводить вычислительные эксперименты и на их основе анализировать данные натуральных экспериментов. Представлены результаты решения трех типов задач. Эти задачи возникли из конкретных экспериментальных исследований, которые проводились в нашей стране (МГТУ МИРЭА совместно с ФИ РАН) и в Физическом институте Чешской академии наук. На основе разработанных автором физико-математических моделей и результатов численных расчетов был сделан анализ наблюдаемых в указанных выше лабораториях физических явлений и дано их объяснение. Создан программный продукт «LP – лазерная плазма», позволяющий в интерактивном режиме вычислять параметры сжатого вещества и разлетающейся плазмы для заданных величин интенсивностей, длительности и длины волны лазерного излучения.

Таким образом, *актуальность и практическая значимость* диссертации обусловлена физическими исследованиями, которые ведутся в крупных научных центрах, таких как МГТУ МИРЭА, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Физическом институте Чешской академии наук, а результаты этих исследований могут быть использованы при планировании дальнейших работ в этой области знаний.

### **Основные положения, выносимые автором на защиту.**

- Разработана физико-математическая модель для определения параметров сжатого вещества за фронтом ударной волны, инициируемой

мощным лазерным импульсом в диапазоне параметров  $I \sim 10^{13} - 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau \sim 1$  нс. С помощью численных расчетов дана интерпретация данных натуральных экспериментов, выполненных на установке “PALS”.

- Предложена физико-математическая модель переноса энергии в турбулентной плазме, образованной при взаимодействии мощных лазерных импульсов с пористыми мишенями. Разработаны алгоритмы и созданы новые версии двумерных программ «Atlant\_C\_turb» (в цилиндрических координатах) и “Atlant\_Sp\_turb” (в сферических координатах), позволяющие моделировать перенос энергии и термоядерные реакции в такой плазме. Продемонстрировано хорошее согласие результатов вычислительных экспериментов с опубликованными данными натуральных экспериментов по взаимодействию мощных лазерных импульсов с мало плотными материалами, выполненные на установке “PALS”.

- Развита упрощенная физико-математическая модель, описывающая параметры плазмы образованной под действием лазерного излучения в диапазоне интенсивностей  $I \sim 10^{11} - 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau \sim 10 - 100$  пс, и получены зависимости, позволяющие определить давление, массу и заряд такой форплазмы вблизи катода лазер-плазменного разряда.

- Создана программа “LP – лазерная плазма”, для определения в режиме “on-line” термодинамических величин плазмы и сжатого вещества от заданных параметров лазерного излучения.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов опирается на физическую обоснованность моделей, решение систем дифференциальных уравнений в частных производных с помощью известных и хорошо обоснованных численных методов с использованием надежных программ, согласием с полученными в натуральных экспериментах данными, непротиворечивостью полученных автором результатов с данными предшествующих исследований

### **Новизна исследований.**

Предложена новая физико-математическая модель распространения энергии в турбулентной плазме, образованной при облучении пористых мишеней мощными лазерными импульсами, и на ее основе созданы новые версии двумерных программ расчета лазерной плазмы в цилиндрической («Atlant-C\_turb») и сферической («Atlant\_Sp\_turb») геометриях. Разработана модель, описывающая параметры лазерной плазмы и сжатого за фронтом ударной волны вещества при умеренных интенсивностях облучения, и создана программа «LP- лазерная плазма» для расчета этих параметров.

Результаты работы докладывались на 16 Международных и российских конференциях и семинарах; опубликованы в 16 статьях, из которых 4 значатся в списке ВАК.

### **Научная и практическая ценность работы**

Полученные в диссертации результаты носят фундаментальный характер, и могут представлять практический интерес в исследованиях по физике лазерной плазмы, которые ведутся в МГТУ МИРЭА, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ, г. Троицк), в Федеральном ядерном центре-ВНИИЭФ (г. Саров) и других организациях.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, каждая из которых включает краткие выводы, и заключения. Она содержит X рисунков и 2 таблицы.

Список цитируемой литературы включает  $Y$  наименований. Общий объем диссертации составляет  $Z$  страниц.

### Содержание работы

Диссертация состоит из трех глав, введения и заключения.

В **первой главе** дан литературный обзор, описывающий физические процессы взаимодействия мощных лазерных импульсов с конденсированными мишенями, образования и разлета плазмы, распространения сильных ударных волн, ионизации и рекомбинации вещества. Во втором и третьем параграфах приводятся основные уравнения, а также описаны алгоритмы и двумерные программы «Атлант\_С» (в цилиндрической геометрии) и «Atlant\_Sp» (в сферической геометрии) [1-3]. В этих программах с помощью метода конечных разностей [4] численно решаются двумерные уравнения газовой динамики и нелинейной теплопроводности в лагранжевых координатах [5], а также распространения лазерного излучения в плазме и кинетики ионизации вещества. С их помощью во второй и третьей главах диссертации были проведены вычислительные эксперименты и анализ данных натуральных экспериментов.

Во **второй главе** диссертации приведены результаты компьютерного моделирования, опирающихся на данные натуральных экспериментов, которые были выполнены группой итальянских физиков на крупнейшем в Западной Европе йодном лазере “PALS”, расположенном в Праге (Чешская республика) [6].

В *первом параграфе* дано краткое описание установки “PALS” и выполненных на ней натуральных экспериментов по изучению распространения сильных ударных волн в конденсированном веществе, инициированных лазерными импульсами. Экспериментальные результаты, в основном, носят интегральный по времени и пространству характер. Для их интерпретации требуется сравнение с расчетными данными. В диссертации описана постановка задачи и приводятся результаты вычислительных экспериментов.

В программе «Atlant\_C» используется три модели уравнений состояния вещества 1) идеальная плазма, 2) уравнения состояния вещества с учетом упругого давления и кинетики ионизации [7-8] (автором диссертации на основе этой модели разработан программный модуль ZRI), и 3) QEOS [9]. Проведено сравнение затрат процессорного времени на расчеты одного варианта, выполненные по трем указанным моделям. Показана экономичность и приемлемая точность модели ZRI, что позволило существенно сэкономить процессорное время ПЭВМ при проведении вычислительных экспериментов. На основании численных расчетов и сравнения с данными натурных экспериментов [10] сформулирована физико-математическая модель и получены соотношения подобия («скэйлинги»), позволяющие определить давление за фронтом ударной волны и ее скорость распространения в конденсированном веществе от параметров лазерного импульса и материала мишени. Обсуждается влияние отражения и рефракции излучения, а также геометрических факторов (отношения диаметра пятна фокусировки к толщине образца) на параметры сжатого вещества за фронтом ударной волны.

*Во втором параграфе* моделируются эксперименты по взаимодействию мощных лазерных импульсов с пористыми мишенями. Эти эксперименты также были выполнены на установке “PALS” [11]. Автором диссертации была предложена физико-математическая модель переноса энергии в такой турбулентной плазме, развит алгоритм и написана новая версия программы “Atlant\_C\_turb” На основании расчетов дана количественная интерпретация наблюдаемых в натурном эксперименте оптических явлений.

*В третьем параграфе* обсуждается возможность использования пористых мишеней для генерации сверхсильных магнитных полей, что, в принципе, открывает возможность моделирования «звездной» плазмы с помощью лазера. Для моделирования такой плазмы разработан алгоритм и написана новая версия программы “Atlant\_Sp\_turb”, позволяющая

моделировать перенос энергии и динамику таких мишеней и рассчитывать термоядерные реакции в сжатом горючем.

В **третьей главе** представлены результаты моделирования плазмы, сформированной с помощью лазерного импульса облучающего электрод лазерно-индуцируемого диода. Работы по созданию такого устройства ведутся в МГТУ МИРЭА совместно с ФИ РАН.

*В первой параграфе* дана схема такого диода и обсуждаются его достоинства [12].

*Во втором параграфе* приведены результаты расчетов лазерной плазмы, формируемой пикосекундным лазерным импульсом.

*В третьем параграфе* на основании одномерных численных расчетов развита физико-математическая модель и получены соотношения подобия («скэйлинги»), позволяющие определять значения потоков массы и заряда такой плазмы (форплазмы) для заданных параметров лазерного импульса (интенсивности, длительности импульса и длины волны излучения). Полученные в диссертации соотношения подобия позволили разработать алгоритм программы “*LP- лазерная плазма*“, с помощью которой определяются термодинамические параметры сжатого конденсированного вещества и разлетающейся плазмы при заданных значениях лазерного импульса и материала мишени.

*В четвертом параграфе* обсуждается влияние эффективности поглощения излучения в плазме для различных длин волн и длительностей лазерного импульса.

*В пятом параграфе* приводится сравнительный анализ параметров форплазмы, которая может быть получена с помощью пикосекундного и наносекундного лазерных импульсов. Результаты расчетов сравниваются (где это возможно) с данными натуральных экспериментов. Дано объяснение наблюдаемых в экспериментах двух групп ионов с зарядом  $Z \geq 9$  и кинетической энергией  $\sim 50-100$  кэВ, и основной массы ионов с  $Z \leq 5$  и с энергией менее 10 кэВ при облучении мишени пикосекундным импульсом с

интенсивностью на уровне  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Показано, что форплазма при пикосекундном импульсе формируется с поверхностного слоя, в то время, как при наносекундном импульсе плазма формируется, в основном, за счет более глубоких слоев мишени. Это важно учитывать физикам - экспериментаторам при интерпретации наблюдаемых спектров ионов, так как поверхностный слой образован, как правило, окислами металлов и примесями. Обсуждается возможность использовать пикосекундный лазер для очистки поверхности электрода.

В *шестом параграфе* дано описание программы « LP - лазерная плазма». Приводится физико-математическая модель, алгоритм и используемые технические средства для работы этой программы.

В **заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертации, формулируются основные положения, выносимые автором на защиту, дан список публикаций автора по теме диссертации и список конференций и научных семинаров, где прошли апробацию эти результаты.

В дополнении дается описание и распечатка программы “*LP- лазерная плазма*”,

## **Список цитируемой литературы**

1. I.G. Lebo, I.V. Popov, V.B. Rozanov, V.F. Tishkin. Two dimensional numerical modeling of laser target heating and compression. Journ. Of Russian Laser Research, (1994), v.15, 136-142
2. A.B. Iskakov, I.G. Lebo, V.F. Tishkin. 2D numerical simulation of the interaction of high-power laser pulses with plane targets using the “Atlant\_C” Lagrangian code. Journ. Of Russian Laser Research, (2000), v.21,247-263.
3. И.Г. Лебо, В.Ф. Тишкин. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2006 г.

4. А.А. Самарский. Теория разностных схем, НАУКА ФИЗМАТЛИТ, Москва, 1983
5. А.А.Самарский, Ю.П.Попов, Разностные методы решения задач газовой динамики, НАУКА, ФИЗМАТЛИТ, Москва, 1980
6. K. Jungwirth K., A. Sejnarova A., L. Juha L., B. Kralicova B., J. Krasa J. The Prague Asterix Laser System. // Phys. Plasmas, 2001, V. 8, С. 2495 -3006.
7. Зельдович Я.Б., Райзер М.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Монография. Москва, Наука, Физматлит., 1966
8. Афанасьев Ю.В., Гамалий Е.Г., Розанов В.Б. Основные уравнения динамики и кинетики лазерной плазмы. // В сб. Труды ФИАН, М., Наука, т.134, 10, (1982)
9. More R.M., Warren K.H., Young D.A., Zimmerman G.B. A new quotidian equation of state (QEOS) for dense matter. Phys. Fluids, V.31, No.10, p.3059-3078, (1988)
10. D.Batani, H. Stabile, A.Ravasio et al. Ablation pressure scaling at short laser wavelength. Phys. Rev., (2003), E68, 067403
11. N.G. Borisenko, A.A. Akunets, A.M. Khalenkov et al. Particular features of the transmission of laser radiation with wavelength 0.438  $\mu\text{m}$  and intensity (3-7) $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> through an undercritical plasma from polymer aerogels. Journal of Russian Laser Research, v.28, #6,548-566, (2007)
12. Korobkin Yu.V., Rozanov V.B., Vergunova G.A., Shikanov A.S. Journal of Russian Laser Research, N3, 101-121, (1998)

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на 16 российских и международных конференциях, школах и семинарах.

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в числе которых 4 статьи - в ведущих рецензируемых российских

журналах (из списка ВАК) и 2 статьи в иностранных рецензируемых журналах.

**Список конференций и семинаров, где докладывались результаты диссертации:**

1. 3<sup>rd</sup> Moscow Workshop on Tagert&Application (Moscow, October 2007) 3<sup>rd</sup> Moscow Workshop on Tagert&Application (Moscow, October 2007)
2. Шестая научная-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов, посвященная 1000-летию Ярославля (Ярославль, 2007).
3. 56-я научная техническая конференция, посвященная 60-летию МИРЭА (Москва, Май 2007),
4. XXXV Международная конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, Февраль 2008),
5. XXX European Conference Laser Interaction with Matter (Darmstadt, September 2008),
6. Fluxes and structures in fluids: physics of geospheres (Moscow, January 2009).
7. 58-я научная техническая конференция (Москва, Май 2009).
8. Международная конференция “Современные проблемы вычислительной математики и математической физики памяти академика А.А.Самарского, к 90-летию со дня его рождения” (Москва, Июнь 2009).
9. 59-я научная техническая конференция МИРЭА (Москва, Май 2009).
10. International conference “Turbulent Mixing and Beyond” (Trieste, Italy, August 2009).
11. Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». Intermatic-2010 (Москва, Ноябрь 2010).
12. 6<sup>th</sup> International Seminar Mathematical models & modeling in: laser-plasma processes; science technologies (Budva, Montenegro, 31 May – 6 June 2009).

13. 7<sup>th</sup> Internation Seminar Mathematical models & modeling in: laser-plasma processes; science technologies (Москва, Мос. Гум. Университет, февраль 2010 г.).
14. The 12th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing (Moscow, Russia, July 2010).
15. Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» . Intermatic-2011 (Москва, Ноябрь 2011).
16. А.И. Лебо, И.Г. Лебо «Модель переноса энергии в турбулентной подкритической лазерной плазме пористых мишеней». Научно-координационная сессия «Исследования неидеальной плазмы NPP-2012» (Москва, 6-7 декабря, 2012 г.)

### **Публикации по теме диссертации**

*В изданиях, рекомендованных ВАК России:*

1. Ю.В. Коробкин, А.И. Лебо, И.Г. Лебо. Исследование параметров формплазмы лазерно-плазменного диода. // *Квантовая электроника* 40, №9, 811-816, 2010
2. А.И. Лебо, И.Г. Лебо. О возможности наблюдения вихревых течений и спонтанных магнитных полей в плазме, образованной при взаимодействии мощных лазерных импульсов с пористыми мишенями. // *Математическое моделирование*, т.21, №11, стр.16-18, 2009
3. А.И. Лебо, И.Г. Лебо. Взаимодействие мощных лазерных импульсов с малоплотными мишенями в экспериментах на установке «PALS» // *Математическое моделирование*, т.21, №1, стр.75-91, 2009
4. А.И. Лебо, И.Г. Лебо, Д. Батани. Зависимость давления в сжатом конденсированном веществе от параметров мощных лазерных импульсов. // *Квантовая электроника*, 38, №8, 747-754, 2008
5. П.В. Конаш, А.И. Лебо, И.Г. Лебо. Моделирование переноса энергии заряженными термоядерными частицами в сжатой лазерной мишени с

учетом спонтанных магнитных полей. // *Математическое моделирование*, (2013)

*Другие публикации:*

1. Ю.В. Коробкин, А.И. Лебо, И.Г. Лебо, И.В. Романов. Исследование процессов стабилизации пинчевания плазмы катодной струи вакуумного лазерно-индуцируемого разряда. // *Научный вестник МИРЭА*. М., 2013, №1, 68-79
2. А.И. Лебо. Программный продукт “LP- лазерная плазма“, номер государственной регистрации 50201250880 от. 13.06.2012
3. А.И. Лебо. Моделирование форплазмы вблизи катода в лазер-плазменном диоде.// *Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения INTERMATIC-2011*, Москва, Энергоатомиздат, ч.1, 42-46, (2011)
4. А.И. Лебо Расчеты массы и заряда плазмы, образованной при взаимодействии пикосекундных импульсов с алюминиевыми мишенями. // *Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения INTERMATIC-2010»*, Москва, Энергоатомиздат, ч.1, 80-82, (2010)
5. Lebo A.I., Lebo I.G., A model of the energy transport in turbulent laser plasma of porous targets // *Physica Scripta*, T142, 1-4, (2010)
6. A.I. Lebo, I.G. Lebo The model of energy transport in turbulent laser plasma of porous targets. // *Proceedings «Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres-2009»* (Moscow, June, 2009), 233-237, A.Yu. Ishlinski Institute for Problems in Mechanics of RAS, 2010
7. A.I. Lebo, I.G. Lebo. Mathematical modeling of power laser interaction with porous targets. // *Proceedings of the XXX ECLIM*. Darmstadt, September 2008, Technische Universitat Darmstadt Report, 68-69, (2009)

8. A.I. Lebo, D.Batani, R.Dezulian, R.Jafer, I.G.Lebo, E.Krousky, Simulations of shock generation and propagation in laser-plasmas, // *Laser and particle beams*, 26, 179-188, (2008)
9. А.И. Лебо, И.Г. Лебо. Математическое моделирование переноса энергии в турбулентной плазме, образованной при взаимодействии мощных лазерных импульсов на пористые мишени, // Сборник трудов «58 научно-техническая конференция», МИРЭА, ч.2, 14-19, (2008)
10. А.И. Лебо, И.Г. Лебо. «Скейлинг» на основе двумерных численных расчетов для описания экспериментов на мощных лазерных установках, // Сборник трудов «56 научно-техническая конференция» МИРЭА, ч.2, 4-8, (2007)
11. A. I. Lebo, P.V. Konash, I.G. Lebo. Laser foam targets for production of magnetized thermonuclear plasma. Turbulent Mixing and Beyond. Third International Conference (21-28 August, 2011). The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, Abstracts, p.49