

На правах рукописи
УДК 536.421.1

Кучерик Алексей Олегович

ДИАГНОСТИКА В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ЛАЗЕРНО-
ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕЩЕСТВА
С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО МОНИТОРА И ОБРАБОТКА
ДИНАМИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЗНИКАЮЩИХ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

Специальность: 01.04.21 — Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владимир 2006

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики Владимирского государственного университета.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, профессор В.Г. Прокошев.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук А.Ф. Банишев

доктор физико-математических наук, профессор В.И. Шмальгаузен

Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится " 23 " ноября 2006 г. в 16 часов в аудитории им. С.А. Ахманова, Корпуса нелинейной оптики на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при МГУ имени М.В.Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ул. Академика Хохлова, дом 1, Корпус нелинейной оптики.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан " " октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физико-математических наук,
доцент

Т.М. Ильинова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Лазерный проекционный микроскоп реализован на практике в 1973 г., в качестве усилителя яркости изображения использовался импульсно-периодический лазер на парах меди. В начале 1990-х годов основные исследования лазерных проекционных микроскопов с различными лазерами на парах металлов были завершены. Ожидалось, что лазерные проекционные микроскопы найдут широкое применение в микроэлектронике, лазерных технологиях, медицине и т.д.

Однако, по-видимому, единственным применением лазерных проекционных микроскопов, успешно развивающимся в настоящее время, является их применение для наблюдения в реальном времени зон взаимодействия мощных потоков энергии с поверхностями различных веществ непосредственно во время взаимодействия. Основным фактором, затрудняющим наблюдение этих зон обычными методами заключается в образовании над ними ярко светящейся плазмы.

Поскольку в подобных наблюдениях основным фактором является возможность наблюдения поверхностей, экранированных от наблюдателя интенсивно светящимися слоями плазмы, а не возможность сильного увеличения изображения наблюдаемой поверхности, был введен термин «лазерный монитор», подчеркивающий ту отличительную способность лазерных проекционных микроскопов, которая позволяет их использовать в рассматриваемом случае.

Интересные и важные научные результаты получены при исследовании плавления сфокусированным лазерным излучением некоторых металлов. Так, например, процесс плавления титана сопровождается образованием перед перемещающейся границей расплава окисной пленки, а на поверхности расплава свинца и титана во время воздействия на них лазерного излучения образуются капиллярные волны. Отмечены особенности эволюции поверхности алюминиевой мишени в результате переноса энергии из плазмы, определены условия замыкания тока на катодах вакуумной дуги и многое другое. И хотя эти наблюдения нуждаются в дальнейшем продолжении, **перспективность и актуальность** их проведения не вызывает сомнений.

Целью работы является диагностика лазерно-индуцированных процессов на поверхности вещества с помощью лазерного монитора и

анализ пространственно-временных характеристик на основе обработки оптических изображений.

Методы исследования. В работе использовались современные методы динамической лазерной микроскопии, обработки оптических изображений, методы нелинейной динамики и математические методы фрактальной геометрии.

Научная новизна работы заключается в том, что в результате проведенных исследований получены новые экспериментальные результаты:

1. Получены при помощи лазерного усилителя яркости в реальном времени и классифицированы динамические оптические изображения области лазерного воздействия на вещество при различных режимах процессов протекающих на поверхности под действием лазерного излучения (ламинарное течение, турбулентное течение, сублимация поверхности).

2. Для оптических изображений области лазерного воздействия в режиме выхлопа расплава получен спектр пространственных частот, имеющий линейный участок, определяемый характерными размерами поверхностных возмущений течения и плотностью мощности излучения. Проведен сравнительный анализ спектров.

3. На основе методов фрактальной геометрии и теории информации рассчитаны характерные параметры, определяющие степень хаотизации оптических изображений области лазерного воздействия. Показана зависимость параметров от плотности мощности падающего излучения и состояния поверхности.

4. Обнаружен хаотический характер низкочастотных гидродинамических колебаний индуцированных лазерным излучением. Показано, что в спектре мощности наблюдается субгармонический каскад удвоения периода колебаний.

5. Восстановленные фазовые портреты имеют качественные и количественные характеристики, подтверждающие сценарий хаотизации гидродинамических частот через разрушение двумерного тора, показана зависимость характерных параметров фазовых портретов от плотности мощности лазерного излучения.

6. Предложен и реализован метод восстановления вероятного вида трехмерных рельефов поверхности образца на основе его двумерного изображения. С использованием методов статистики Херста рассчитаны коэффициенты корреляции восстановленных рельефов.

Практическая ценность работы:

1. Лазерная диагностическая система позволяет проводить наблюдение области взаимодействия лазерного излучения с веществом в реальном времени в пространственных и временных масштабах, характерных для технологических процессов, что дает возможность их детального исследования.

2. Предложенные методы обработки оптических изображений поверхности позволяют разделять режимы состояния поверхности расплава, что делает возможным управление в реальном времени различными лазерными технологическими процессами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При взаимодействии лазерного излучения с плотностью мощности 10^5Вт/см^2 - 10^7Вт/см^2 с металлами (сталь, титан, свинец и др.) в ванне расплава наблюдается турбулентное течение. Спектр пространственных частот, рассчитанный по изображениям гидродинамического течения, индуцированного лазерным излучением на поверхности вещества имеет линейный участок, определяемый характерными размерами поверхностных возмущений течения и плотностью мощности излучения. В качестве количественных характеристик, определяющих степень хаотизации поверхности в области лазерного воздействия, могут быть использованы фрактальные и информационные размерности соответствующих оптических изображений.

2. При установившемся режиме воздействия лазерного излучения с плотностью мощности порядка 10^4Вт/см^2 с расплавами металлов, Фурье-спектр низкочастотных гидродинамических колебаний, возбуждаемых в каверне имеет хаотическую природу. Определен сценарий хаотизации гидродинамических колебаний через субгармонический каскад удвоения периода. Качественные и количественные характеристики фазовых портретов подтверждают развитие в ванне расплава маломерного хаоса.

3. Для процессов взаимодействия лазерного излучения с графитовыми образцами при температуре не превышающей 4000К и давлении близком к атмосферному, наряду с твердофазным разрушением поверхности, зафиксировано плавление. Для определения свойств поверхности в процессе воздействия разработана оригинальная методика восстановления трехмерного рельефа поверхности по двумерным оптическим изображениям полученным при помощи лазерного монитора.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в научных журналах «Известия РАН. Серия физическая», «Доклады академии наук», «Laser Physics», докладывались на Международной конференции LANE'2001 (Эрланген, Германия, 2001), VII Междунар. конф. «Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения»

(Владимир-Суздаль, Россия, 2001), II Российско-французском лазерном симпозиуме «Современные направления в лазерной физике: спектроскопия, квантовые эффекты и атомная оптика, оптические изображения и информация», (Владимир-Суздаль, Россия, 2001), Международной конференции LAT-2002 (Москва, Россия, 2002), Международной конференции ILLA-2003 (Смолян, Болгария, 2003), Международной конференции Laser Optics-03 (Санкт - Петербург, Россия, 2003), First Russian–French Laser Physics Workshop for Young Scientists (Санкт - Петербург , Россия, 2004), International symposium Modern Problems of Laser Physics'04 (Новосибирск, Россия, 2004), Международной конференции LAT-2005 (Санкт - Петербург, Россия, 2005). По материалам диссертации опубликовано 20 работ, из них 9 статьи и 11 тезисы докладов.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 статей и 11 тезисов докладов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, в том числе 9 работ автора и двух приложений. Материал диссертации изложен на 125 страницах, сопровождается 54 рисунками и 7 таблицами.

Личный вклад

Все полученные в диссертации результаты получены автором либо лично, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, интерпретации и обсуждении результатов.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определена методическая основа исследований, изложена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и дано краткое содержание работы по главам.

В **первой главе** дается краткий обзор научной литературы по основным гидродинамическим процессам, развивающимся при воздействии лазерного излучения на поверхность различных материалов. Рассмотрены условия развития стохастических автоколебаний в ванне расплава и методы их анализа базирующиеся на таких разделах современной математики как нелинейная динамика, фрактальная геометрия.

В *параграфе §1.1.* сформулирована в общем случае система уравнений, описывающая процесс тепло-массопереноса расплава. Показано, что при определенных значениях безразмерных параметров

возможно развитие многовихревого течения при локальном нагреве сверху.

В *параграфе §1.2.* приведены экспериментальные результаты, полученные на стальном образце, подтверждающие рассмотренные в параграфе §1.1 общие принципы формирования многовихревого течения. Рассмотрены также работы других авторов, в которых численно моделируется процесс распада одновихревого движения жидкости в ячейке при локальном нагреве сверху. Определена зависимость характера течения от скорости нагрева и размеров ячейки.

Параграф §1.3. посвящен вопросам развития стохастических автоколебаний в гидродинамических экспериментах при нагреве жидкости. Обозначены основные возможности установления автоколебательного режима движения жидкости.

В *параграфе §1.4.* рассматриваются методы анализа гидродинамических процессов с использованием подходов нелинейной динамики. На примере системы Лоренца описывается понятие динамического хаоса. Приведены качественные и количественные признаки хаотического поведения динамической системы.

Во **второй главе** представлен лазерный диагностический комплекс для возбуждения и изучения процессов на поверхности материалов. Исследованы гидродинамические явления, протекающие в области воздействия в режиме выплеска расплава, показано изменение их характера с изменением средней мощности лазерного излучения, предложены характерные параметры оптических изображений поверхности, позволяющие классифицировать протекающие на поверхности процессы по классам хаотизации. Изучен процесс формирования волн на поверхности расплава при кристаллизации после окончания действия лазерного импульса.

В *параграфе §2.1.* сформулирована теоретическая модель, разрешающая корректно качественно и количественно описывать протекающие в области лазерного воздействия гидродинамические процессы. Рассчитаны безразмерные критерии, позволяющие определить, что в ванне расплава развивается турбулентность.

В *параграфе §2.2.* рассмотрен лазерный диагностический комплекс (см. рис. 1.), состоящий из YAG:Nd³⁺ ($\lambda = 1.06$ мкм) лазера, работающего в импульсно периодическом режиме (длительность импульса $\tau = 1.5 \div 2.5$ мс, частота следования импульсов $f = 150$ Гц) в диапазоне мощности от 10 до 100Вт, излучением которого производилось воздействие на образцы; лазера на парах меди CVL-10 с частотой следования импульсов $f = 16$ кГц, для диагностики лазерно-индуцированных процессов; оптической системы для формирования изображения области лазерного воздействия и

фокусирования излучения силового лазера; системы регистрации на основе скоростной SMOS-камеры VS-Fast; управляющего компьютера для контроля лазерно-индуцированных процессов и их регистрации; сервера, хранящего изображения области лазерного воздействия, полученные в различных экспериментах.

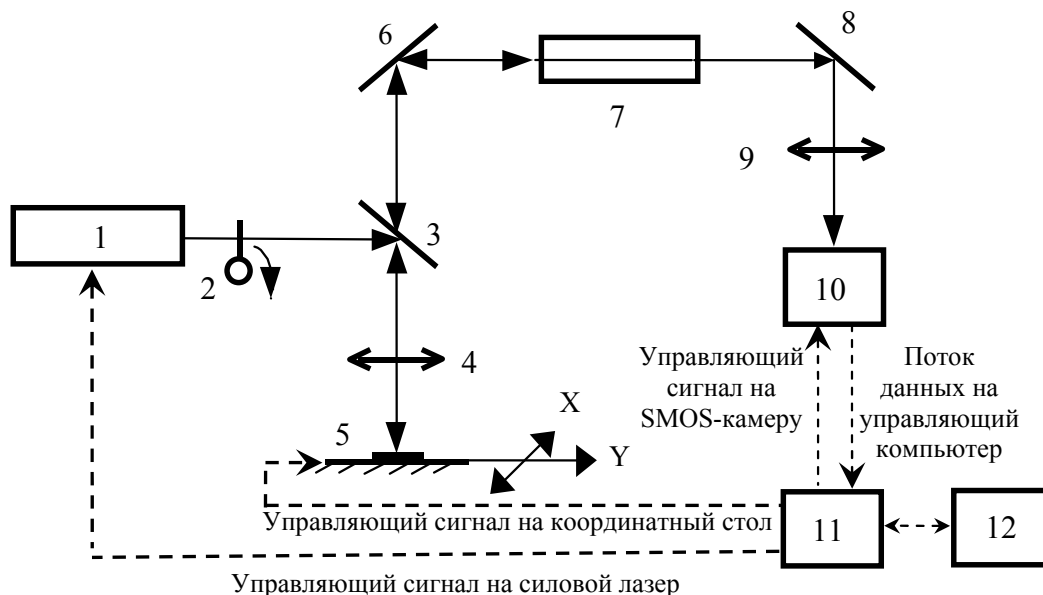


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер (YAG:Nd), 2 – шторка, 3 – поворотное зеркало для излучения с $\lambda=1,06$ мкм, 4 – объектив, 5 – исследуемый образец на координатном столе, 6 – поворотное зеркало, 7 - лазер на парах меди, 8 – поворотное зеркало, 9-корректирующая линза, 10 – SMOS-камера с жестким диском, 11 – управляющий компьютер, 12 – сервер

В параграфе §2.3. Представлены оптические изображения области лазерного воздействия на поверхности металла, полученные при помощи описанной выше экспериментальной установки. Зафиксированы различные состояния поверхности, соответствующие ламинарному течению расплава, выплеску под действием давления паров отдачи при кипении жидкости, в виде турбулентного течения кольцевой формы и расширению области турбулентного течения при движении расплава по инерции после прекращения кипения и исчезновения давления паров отдачи. После прекращения действия лазерного импульса обнаружено формирование волн на поверхности расплава.

В параграфе §2.4. получены распределения энергии гидродинамического течения по пространственным частотам (см. рис. 2.) в области лазерного воздействия при различных значениях плотности мощности излучения для изображений, соответствующих движению

расплава по инерции. Расчет энергии, приходящийся на соответствующий пространственный масштаб, проводился с использованием двумерного преобразования Фурье.

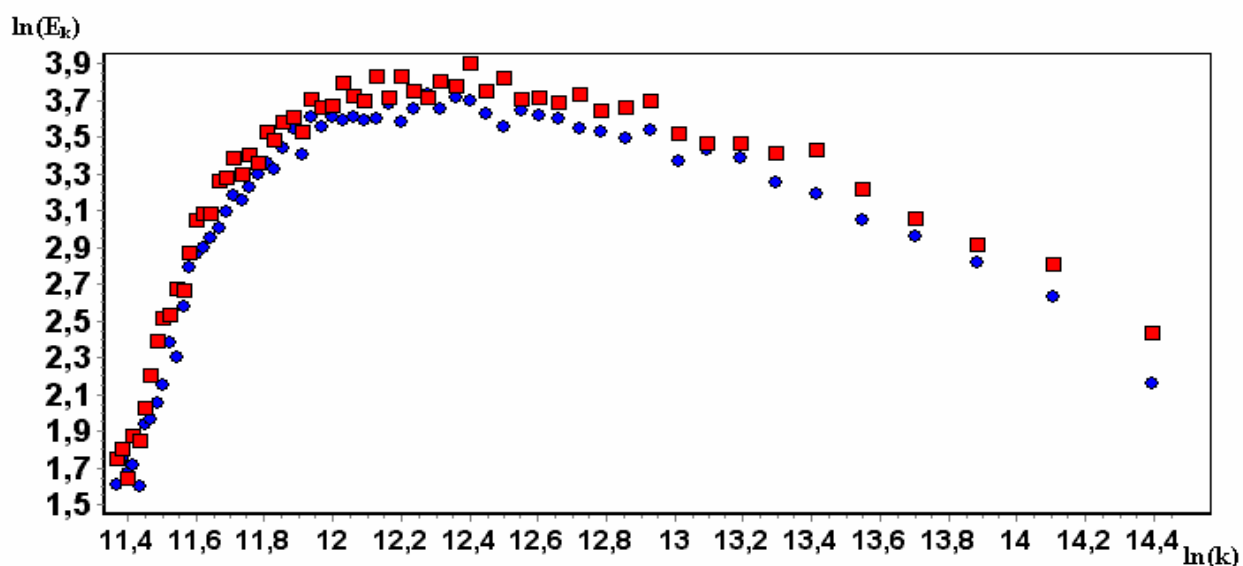


Рис. 2. Распределение энергии по пространственным масштабам в двойном логарифмическом масштабе рассчитанные для изображения соответствующего движению расплава по инерции: квадратные маркеры – 20Вт; круглые маркеры – 60 Вт.

На графиках (рис. 2) можно выделить линейный участок убывания, наклон которого соответствует степени $-1,43$ в законе распределения энергии пульсации скорости по пространственным масштабам

$$E(k) = C_1 * k^{-1,43} \quad (1)$$

Средний радиус области занимаемой расплавом (лазерной каверны) $r_{max}=0,3$ мм соответствует внешнему масштабу турбулентности, $r_{min}=0,005$ мм соответствует минимальному расстоянию между градациями яркости оптического изображения. Такой вид зависимости позволяет выделить инерционный интервал и говорить о развитом турбулентном многовихревом движении, однако не позволяет разделять изображения, полученные при разных значениях средней мощности по классам хаотизации. С увеличением плотности мощности падающего излучения при достижении значения $Q \geq 10^7 \text{ Вт/см}^2$, можно наблюдать смену режима выплеска расплава на фонтанирование, с уменьшением плотности мощности происходит переход в маломодовый режим хаотических гидродинамических колебаний.

В параграфе §2.5. вводятся количественные характеристики турбулентного течения в режиме выплеска расплава. Предложен алгоритм преобразования изображения области воздействия лазерного излучения на

вещество в двухцветное на основе модели многовихревого движения. Анализ полученных изображений методами фрактальной геометрии и теории информации позволил разделить состояния поверхности по классам хаотизации.

Однако прямое применение предложенных методов было невозможно из-за наличия большого количества различных градаций серого и фоновых компонент, для устранения вызванных этим ошибок были предложены модификации расчетов таких величин, как размерность Хаусдорфа и энтропия Шеннона, полученные параметры (локальная размерность подобия D_{lx} , информационная энтропия ε_i и топологическая энтропия ε_t) позволили идентифицировать различные режимы состояния поверхности под действием лазерного излучения при различной интенсивности.

Таблица № 1

Характерные параметры	Мощность 20Вт		Мощность 60Вт	
	Волны на поверхности	Турбулентное течение	Волны на поверхности	Турбулентное течение
D_{lx}	1,91	2,23	2,01	2,62
ε_i	0,26	0,47	0,29	0,61
ε_t	0,92	1,1	0,93	1,69

Из таблицы видно, что для изображения без особенностей, в нашем случае это волны на поверхности расплава вещества, величина D_{lx} близка к 2. Если распределение яркости оптического изображения соответствующего турбулентному течению, становится хаотическим, то размерность D_{lx} скачком возрастает, причем при увеличении плотности мощности амплитуда скачка увеличивается. Аналогичное изменение испытывают величины информационной и топологической энтропии, то есть данные параметры характеризуют степень хаотизации оптического изображения, а значит и течения, которое ему соответствует.

В параграфе §2.6. предлагается механизм формирования волн на поверхности металлов. Проведенные эксперименты позволяют сделать предположение, что волновые структуры образуются на расплаве при кристаллизации, после окончания действия лазерного импульса. Поскольку затухание гидродинамических возмущений после выключения лазерного излучения происходит неравномерно, то в первую очередь затухают мелкомасштабные возмущения, и начиная с некоторого момента времени остается только крупномасштабное вихревое течение. При натекании потока на границы и равенстве его скорости фазовой скорости

волн должны формироваться стационарные капиллярные волны. Если длина волны известна, то можно найти скорость натекающего потока по формуле:

$$U^2 = \frac{2\pi\sigma}{\lambda\rho} th\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где λ - длина волны, измеренная по оптическому изображению волновых структур (рис. 2.4). Из (2) получаем значение скорости $U = 8,43$ м/с для титана, $U = 2,8$ м/с для свинца. Значения скоростей потока достаточно хорошо соответствуют теории и результатам измерений. При таком механизме формирования капиллярных стационарных волн и их кристаллизации возможно образование спиральных волновых структур, которые и обнаруживаются в некоторых экспериментах.

В **третьей главе** проведены эксперименты по изучению временных зависимостей параметров (амплитуды, энергии) лазерно-индуцированных гидродинамических колебаний на поверхности различных металлов.

В *параграфе §3.1.* рассмотрены особенности установившегося многовихревого движения расплава. Определены параметры лазерного излучения, при которых возможно развитие в ванне расплава маломодового хаоса. Представлен метод анализа динамических систем по одномерной наблюдаемой реализации.

В *параграфе §3.2.* представлена методика измерений временных зависимостей яркости оптических изображений, соответствующих гидродинамическим процессам индуцированным лазерным излучением в расплаве металла.

В *параграфе §3.3.* приведены зависимости яркости $J(t)$, в центре изображения, которые испытывают достаточно сильные выбросы и имеют характер нерегулярных колебаний (см. рис. 3). Анализ статистических свойств (*параграф §3.4.*), проведенный с использованием одномерного преобразования Фурье, показал, что высокочастотная часть спектра содержит частоты отвечающие частоте силового лазера ее гармоникам и субгармоникам. В низкочастотной части спектра наблюдается характерный пьедестал, что указывает на хаотическую природу колебаний. После фильтрации (частот силового лазера) в низкочастотной части спектра удалось выявить субгармонический каскад частот (см. рис. 4). В зависимости от исследуемого вещества и средней мощности лазерного излучения наблюдалось не только увеличение количества бифуркаций, но и появление новых колебаний испытывающих в свою очередь удвоение периода. Наблюдаемые колебания можно объяснить только перестройкой режимов течения расплава от одновихревого к многовихревому и обратно.

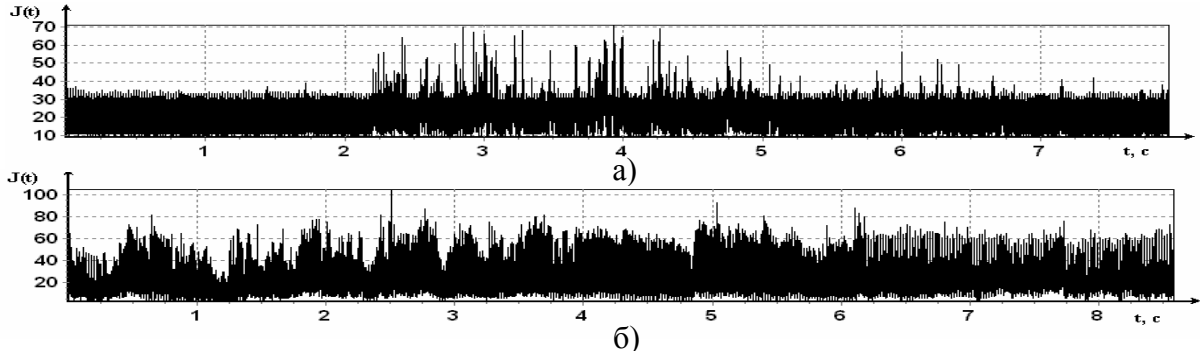


Рис. 3 Зависимость яркости в центре изображения от времени: а) сталь; б) свинец.

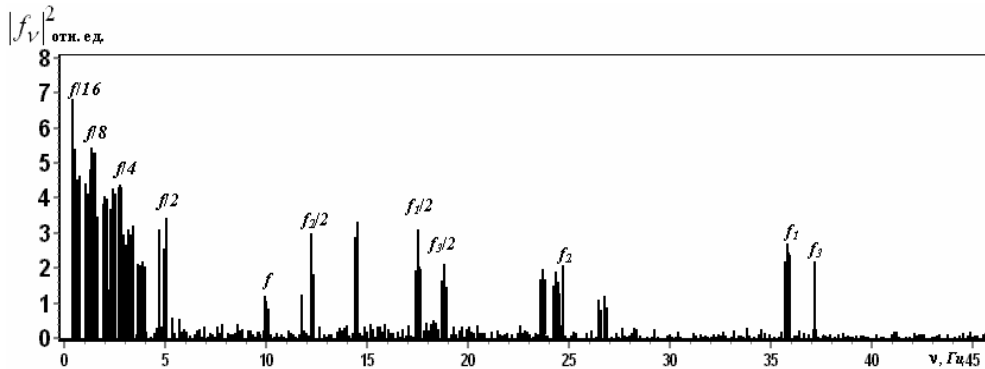


Рис. 4. Спектр мощности временной зависимости отраженного излучения от поверхности металла в момент времени $t=8\text{с}$ после начала воздействия лазерного излучения мощностью 30Вт

Параграф §3.5. посвящен динамическим и информационным свойствам временных зависимостей яркости отраженного излучения. Для их определения использовались методы нелинейной динамики и фрактальной геометрии. С использованием теоремы Такенса были восстановлены фазовые портреты динамической системы, соответствующей наблюдаемым гидродинамическим колебаниям, которые возбуждаются лазерным излучением (см. рис 5). Динамические и информационные свойства рассчитывались с использованием аппарата размерностей. Были определены размерность по Ляпунову D_L , фрактальная D_H , информационная D_I и корреляционная D_C . Расчет для фазовых портретов в различные моменты времени позволил определить скорость и характер хаотизации лазерно-индуцированных гидродинамических колебаний (см. таб. 2). Во всех случаях в начальный момент времени значения размерностей близко к размерности двумерного тора, при дальнейшем воздействии развивается хаотический режим через разрушение двух или трех независимых гидродинамических частот. Размерности аттрактора приближаются к значениям характерным для «странных аттракторов» динамических систем с тремя степенями свободы.

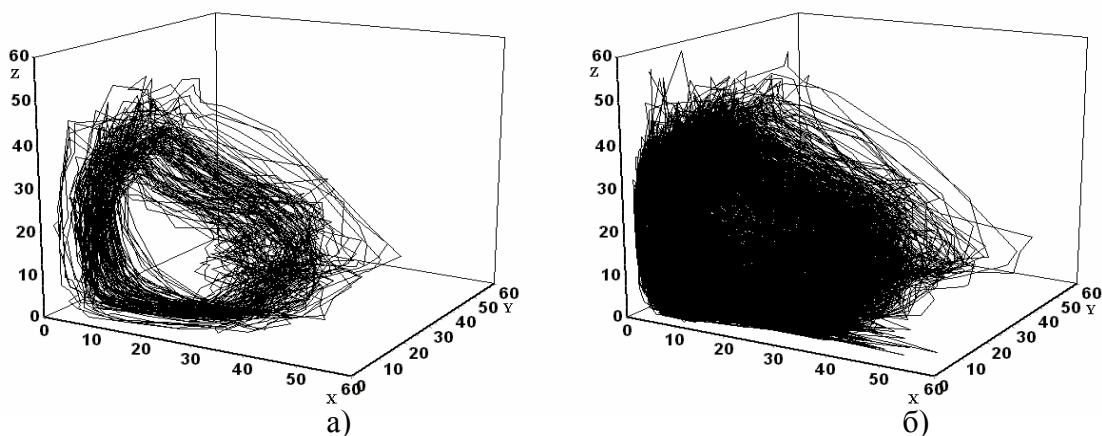


Рис. 5 Динамика изменения фазовых портретов в пространстве координат временной задержки, полученная по одномерной реализации яркости изображения области воздействия лазерного излучения средней мощности 20Вт на поверхность свинца при разных длительностях t реализации: а) $t=1с$; б) $t=8с$;

Таблица №2

Размерность	Длительность реализации	
	1с	8с
D_L	2,12	2,77
D_H	2,08	2,84
D_I	2,07	2,75
D_C	2,05	2,71

В четвертой главе исследованы процессы протекающие на поверхности графитовых образцов непосредственно в процессе воздействия на них лазерного излучения.

В параграфе §4.1. представлены результаты исследования эволюции поверхности графита с помощью лазерного монитора. Зафиксировано, что наряду с твердофазным разрушением поверхности графитовых образцов (средняя мощность $P < 50Вт$), наблюдаются признаки плавления поверхности внутри области воздействия (средняя мощность $P > 50Вт$).

В параграфе §4.2. рассмотрен метод восстановления трехмерного рельефа поверхности на основе двумерного изображения. Метод основан на законе отражения лазерного излучения от поверхности графитовых образцов с учетом отражательных свойств материала (индикатрисы рассеяния при отражении). Для восстановленных рельефов оценивалась шероховатость поверхности с использованием статистики Херста.

Расчеты коэффициента корреляции высот рельефа приведены в параграфе §4.3. Анализ рельефов поверхности, полученных для различных

моментов воздействия, позволяют установить, что до воздействия распределении высот имеет хаотический характер, в процессе воздействия удается выявить появление корреляции в распределении высот, достигающей максимума при установлении границ области лазерного воздействия.

Таблица № 3

Время после начала воздействия	Коэфф. корреляции $C(\Delta r)$
0с	0,042
0,44с	0,283
0,76с	0,892

Следовательно, шероховатость поверхности уменьшается, что может являться косвенным признаком образования жидкой пленки внутри лазерной каверны.

В **заклучении** сформулированы следующие основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Получены при помощи лазерного усилителя яркости в реальном времени и классифицированы динамические оптические изображения области лазерного воздействия на вещество для различных процессов, протекающих на поверхности под действием лазерного излучения (ламинарное течение, турбулентное течение, сублимация поверхности).
2. Для оптических изображений области лазерного воздействия в режиме выплеска расплава получен спектр пространственных частот гидродинамических колебаний, имеющий линейный участок, определяемый характерными размерами поверхностных возмущений течения и плотностью мощности излучения. Проведен сравнительный анализ спектров.
3. На основе методов фрактальной геометрии и теории информации рассчитаны характерные параметры, определяющие степень хаотизации оптических изображений области лазерного воздействия. Показана зависимость параметров от плотности мощности падающего излучения и состояния поверхности.
4. Обнаружен хаотический характер низкочастотных гидродинамических колебаний, индуцированных лазерным излучением. Показано, что в спектре мощности наблюдается субгармонический каскад удвоения периода колебаний.
5. Восстановленные фазовые портреты имеют качественные и количественные характеристики подтверждающие сценарий хаотизации гидродинамических частот через разрушение двумерного тора, показана зависимость

характерных параметров фазовых портретов от плотности мощности лазерного излучения.

6. Исследованы процессы протекающие на поверхности графитовых образцов под действием лазерного излучения. Полученные при помощи лазерного монитора оптические изображения преобразованы в трехмерный рельеф поверхности. Для этого предложен и реализован метод восстановления вероятного вида трехмерных рельефов поверхности образца на основе его двумерного изображения. С использованием методов статистики Херста рассчитаны коэффициенты корреляции восстановленных рельефов. Показано, что корреляция в распределение высот возрастает при лазерном воздействии.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Багаев С.Н. Прокошев В.Г. Кучерик А.О. Аракелян С.М. Климовский И.И. Гидродинамика расплава поверхности металла при лазерном воздействии; наблюдение смены режимов в реальном времени. Доклады академии наук. Т. 395, №. 2, 2004, с.183-186
2. В.Г. Прокошев, Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик Гидродинамические неустойчивости и волны, индуцированные импульсно-периодическим лазерным излучением на поверхности вещества// Известия академии наук. Серия физическая. Т. 70, №3, 2006 с. 354-360
3. Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев Визуализация и восстановление рельефа области лазерного воздействия на поверхность графита // Известия академии наук. Серия физическая. Т. 70, №3, 2006 с. 423-426
4. D. V. Abramov, S. M. Arakelian, A. F. Galkin, I. I. Klimovskii, A.O. Kucherik, and V. G. Prokoshev A Laser-induced process on the surface of a substance and their laser diagnostics in real time// Laser Physics, Vol. 15, No. 9, 2005, pp. 1313–1318
5. Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев. «Пространственные и динамические свойства гидродинамических неустойчивостей, индуцированных мощным лазерным излучением на поверхности вещества»// В сб.: Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Выпуск 4, 2002г., / Под ред. В.Е. Фортова стр. 185-190.
6. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Гамыгин К.А., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. Временная эволюция поверхности графита под действием сконцентрированного лазерного излучения. // В сб.: Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний

- ОИВТ РАН. Выпуск 6 #8211; 2003 / Под ред. В.Е. Фортова и А.П. Лихачева. - М.: ОИВТ РАН. 2004. С. 193-198.
7. V.G.Prokoshev, D.V.Abramov, S.Yu.Danilov, Al.O.Kucherik, S.M.Arakelian. Laser diagnostic of spatial-time hydrodynamic instabilities on melted metal surface. //Proceedings of SPIE Vol.4429, p.96-100, 2001
 8. V.G.Prokoshev, A.F.Galkin, I.I.Klimovskii, D.V.Abramov, S.Yu.Danilov, A.O.Kucherik, S.M.Arakelian. Diagnostic system on basis of laser brightness amplifier for monitoring and controlling the laser technological processes. // Proceedings of SPIE vol. 4644 (2002), с.168-175.
 9. V. G. Prokoshev, Al.O.Kucherik, S.M.Arakelian. Fractal optical images under the laser action on the substance surface. // International conference on laser assisted net shape engineering LANE'2001, Erlangen, Germany, 28-31.08.2001, pp. 717-722
 - 10.V.Prokoshev, Al.Kucherik, D.Abramov, A.Galkin, I.Klimovskii, S.Arakelian. Non-linear dynamics of laser-induced processes on substance surface in real time. //Тезисы докладов II Российско-французского лазерного симпозиума «Современные направления в лазерной физике: спектроскопия, квантовые эффекты и атомная оптика, оптические изображения и информация», Владимир-Суздаль, 30.09-7.10.2001, с. 50-51.
 - 11.D.V. Abramov, S.M. Arakelian, A.O. Kucherik, V.G. Prokoshev. Fractal properties of optical images of surface under laser action // Conference program, LAT-2002, 22-27.06.02, Moscow, с.124.
 - 12.D.V.Abramov, S.M.Arakelian, A.O.Kucherik, V.G.Prokoshev. Fractal and non-linear properties of fast hydrodynamic processes // EPS-12, 23-30.08.02 Budapest
 - 13.V.G. Prokoshev, A.O. Kucherik, D.V. Abramov, I.I. Klimovskii, A.F. Galkin, S.M. Arakelian Diagnostic of laser modification of a graphite surface.// Laser Matter Interaction-XI, 30.06.03-04.07.03 ,Pushkin, Russia
 - 14.A.O. Kucherik, V.G. Prokoshev, S.M. Arakelian Fractal properties of spatio-temporal instabilities for laser-induced hydrodynamic phenomena on the surface of condensed matters // Laser Optics XI, 30.06.03-04.07.03 ,St.-Peterburg, Russia
 - 15.A.O. Kucherik, V.G. Prokoshev, S.M. Arakelian Dynamical chaos and fractal properties of spatio-temporal instabilities for laser-induced hydrodynamic phenomena on the surface of condensed matters // "Dynamical Chaos in Classical and Quantum Physics" August 4-9, 2003, Novosibirsk, Russia
 - 16.A.O. Kucherik, V.G. Prokoshev, S.M. Arakelian Stochastic and non-linear properties of spatio-temporal instabilities for laser-induced hydrodynamic phenomena on the surface of condensed matters// VIII International

- conference Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Application, 27.09.03-01.10.03, Plovdiv-Smolyan, Bulgaria
17. D. Abramov, A. Kucherik, V. Prokoshev, S. Arakelian. Laser hydrodynamics in a real time on the surface of substance. Col. of abstracts of 4th international symposium modern problems of laser physics MPLP'04, August 22 - 27, 2004, Novosibirsk, Russia.
18. D.V. Abramov, S. M. Arakelian, A.F. Galkin, I.I. Klimovskii, A. O. Kucherik, V. G. Prokoshev Studying of a graphite surface melting in real time by the laser brightness amplifier. International conference "Laser application technology -05", Russia, St-Petersburg 11-15.05.2005.
19. Д.В. Абрамов, С.М. Аракелян, А.Ф. Галкин, И.И. Климовский, А.О. Кучерик, В.Г. Прокошев. Лазерная диагностика процесса плавления углерода в воздухе атмосферного давления под действием сконцентрированных потоков энергии. XI Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Звенигород, 13-18 июня 2005.
20. Климовский И.И., Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Квачева Л.Д., Кучерик А.О., Михалицын Л.А., Прокошев В.Г. Плавление углерода при давлении порядка атмосферы и температуре, не превышающей 4000К// 4-ая Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», Москва, 26-28 октября 2005

Подписано в печать 18.10.06.

Формат 60^x84//16. Бумага для множительной техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. Л. 0,93. Уч. –изд. л. 0,97. Тираж 100 экз.

Заказ _____

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.