На правах рукописи

Щербина Мария Евгеньевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АНСАМБЛЯ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2016

Работа выполнена в лаборатории макрокинетики неравновесных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук Научном центре волновых исследований (филиал) (НЦВИ ИОФ РАН)

Научный руководитель: **Кириченко Николай Александрович,**
профессор,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Казарян Мишик Айразатович**,
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт им.
П.Н. Лебедева Российской академии наук

Битюрин Никита Михайлович,
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академиии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «14» сентября 2016 г. в 15:00 ч. На заседании Диссертационного совета Д 002.063.01 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.063.01
Доктор физико-математических наук, /Кузькин В.М./

1. Общая характеристика работы

С появлением лазеров возникла такая область исследования, как взаимодействие излучения с веществом. Повышенный интерес к данной области связан как с фундаментальными исследованиями поведения вещества в сильно неравновесных условиях лазерного воздействия, так и в связи с прикладными задачами, которые могли бы быть эффективно решены путем контролируемого лазерного воздействия на объект. В то же время, в связи с возросшим интересом к свойствам объектов нанометрового масштаба, в настоящее время активно исследуются процессы, происходящие при взаимодействии таких объектов с лазерным излучением.

Одним из эффектов, возникающих при облучении твердой мишени, является лазерная абляция – совокупность физико-химических процессов, результатом которых является удаление вещества с поверхности или объема твердого тела [1]. Лазерная абляция в жидкости используется для синтеза микро- и наночастиц и привлекает все большее внимание исследователей в виду простоты экспериментальной установки и возможности получения химически чистого продукта [2]. В качестве твердотельной мишени могут быть использованы различные материалы (металлы, полупроводники или диэлектрики). Размер и физические свойства полученных частиц зависят от типа среды, материала мишени и параметров эксперимента (длина волны излучения, длительность импульса, мощность, диаметр пятна в области перетяжки пучка).

В виду многообразия и простоты методики синтеза нано- и микрочастиц им находят применение в различных областях. Например, металлические наночастицы широко используются в фотонике, микроэлектронике, химии, медицине, различных сенсорах для химии и биологии [3-7]. Взаимодействие лазерного излучения с частицами применяется при удалении раковых клеток [8].

При облучении изолированных частиц в растворе их взаимодействие с лазерным излучением происходит за счет его поглощения свободными электронами [2]. Затем происходит термализация поглощенной энергии и ее передача материалу частицы. Эти электроны характеризуются плазмонным

резонансом и, соответственно, степень взаимодействия зависит от интервала между длиной волны излучения и максимумом поглощения. При генерации частиц в вакууме данное взаимодействие не является существенным, поскольку не происходит возврат частиц в область лазерного пучка. В случае жидкой среды, наоборот, частицы могут неоднократно попадать в зону воздействия благодаря конвекции, что может приводить к таким явлениям, как фрагментация и коагуляция частиц.

Впервые фрагментация частиц при их генерации была упомянута в работах [9-11] как постепенное уменьшение размеров частиц в растворе под действием лазерного излучения. Важной характеристикой коллоидного раствора частиц является их функция распределения по размерам. Как следствие процесса фрагментации, происходит сдвиг данной функции в сторону меньших значений [12]. На сегодняшний день накоплено большое количество экспериментальных работ по фрагментации частиц, индуцированной лазерным излучением [13-18]. В качестве возможных механизмов рассматривают поверхностное испарение [13], кулоновский взрыв [15], абляцию в ближнем поле [19] и деление пополам [20]. При этом, на реализацию того или иного физического процесса влияет множество различных параметров: длительность импульса излучения, энергия в импульсе, размер и материал исследуемых частиц, концентрация коллоидного раствора, рабочая жидкость.

Помимо фрагментации частиц в жидкостях под действием лазерного излучения могут также происходить и обратные процессы - их коагуляция, агломерация и коалесценция. Они могут существенно влиять на размеры частиц и рассматривались в работах [21-25]. Были предложены различные механизмы агломерации, связанные, например, с взаимной поляризацией частиц и диполь-дипольным взаимодействием [21, 26].

Несмотря на вышесказанное, механизмы фрагментации и агломерации частиц в жидкостях на сегодняшний день исследованы не достаточно и единого мнения о физических процессах, вызывающих деление и слипание частиц, нет. В ряде случаев имеющихся экспериментальных данных недостаточно.

Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих получить нужную информацию, является исследование динамики функции

распределения частиц по размерам в различных условиях облучения. Это позволяет выделить существенные параметры, управляющие поведением наночастиц, что можно далее использовать для построения теории, допускающей уже прямое количественное сопоставление с экспериментальными данными.

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование процесса фрагментации и агломерации микро- и наночастиц различных материалов в жидкостях под действием импульсно-периодического лазерного излучения, выявление механизмов данных процессов.

Основная часть результатов получена в ходе работ в Научном Центре Волновых Исследований ИОФ РАН, г. Москва, Россия.

Научная новизна

По тематике исследования накоплено большое количество экспериментальных результатов, однако нет полного представления и теоретического обоснования механизмов, определяющих поведение ансамблей частиц в жидкостях при лазерном воздействии. В частности, впервые предложена математическая модель, позволяющая количественно описать фрагментацию микро- и наночастиц в коллоидном растворе под действием импульсно-периодического излучения (нано- и пикосекундные длительности импульсов). Впервые предложен механизм, объясняющий наблюдавшуюся в эксперименте ускоренную коагуляцию частиц в коллоидном растворе под действием импульсно-периодического излучения. Впервые применено уравнение переноса для описания динамики функции распределения наночастиц по размерам.

В диссертационную работу легли результаты, полученные автором за последние 5 лет.

Защищаемые положения

1. Фрагментация наночастиц малых размеров (r < 100 нм) под действием излучения с наносекундными импульсами происходит путем отделения мелких фрагментов от больших частиц

2. Фрагментация крупных (субмикронных) частиц алюминия может происходить путем их деления пополам – на близкие по размеру части

3. При облучении пикосекундными лазерными импульсами коллоидных растворов с высокой концентрацией наночастиц может происходить их ускоренная агломерация за счет возникновения гидродинамического взаимодействия парогазовых оболочек

4. Эволюцию функции распределения наночастиц в растворе можно описать с помощью уравнения переноса в пространстве размеров частиц

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международных и российских конференциях, в частности, на конференциях European Material Research Society (EMRS) 2013 (г. Страсбург, Франция) и 2014 (г. Лилль, Франция), 54-ая и 55-ая Научная конференции МФТИ. Результаты, полученные в диссертационной работе, неоднократно докладывались на научных семинарах НЦВИ ИОФ РАН им. Прохорова и МГУ им. М.В. Ломоносова. Работа поддержана грантами РФФИ 12-02-31053 мол_а и 15-32-20926 мол_а_вед, Научными школами Ф.В. Бункина 214.2012.2, 214.2012.9 и 4484.2014.2.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 7 работ, список которых приведен ниже, из которых 5 работ опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Личный вклад автора

Постановка задачи и темы исследований были сформулированы научным руководителем д.ф.-м.н., проф. Н.А. Кириченко и зав. лабораторией д.ф.-м.н. Г.А. Шафеевым. Математические модели исследуемых процессов были построены на основе имеющихся экспериментальных данных совместно с Н.А. Кириченко. Личный вклад автора состоял в исследовании математических моделей, проведении расчетов и анализе полученных результатов. Все научные результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения (Глава 1), четырех глав (Главы 2, 3, 4, 5), содержащих основные результаты работы, Заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, включая 42 рисунка и библиографию из 75 наименований

Практическая значимость работы

Математическое моделирование наблюдаемых в эксперименте явлений позволяет объяснить механизмы, приводящие к фрагментации и агломерации частиц различных материалов (металлов) в жидкости при воздействии лазерного излучения. Данные исследования являются частью более общей проблемы – возможности контроля функции распределения частиц, а именно, получения частиц с заданными размерами, необходимых в таких областях как биология, медицина, микроэлектроника и т.д. Полученные результаты являются важным вкладом в данную область исследований, поскольку за последние годы было накоплено большое число экспериментальных фактов, однако было предпринято лишь относительно небольшое количество теоретических исследований, допускающих сравнение с экспериментальными данными.

2. Краткое содержание работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения.

Во введении (глава 1) обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи работы, аргументирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Дается обзор публикаций, относящихся к исследованиям поведения наночастиц под действием лазерного излучения.

Во второй главе проводится анализ экспериментальных результатов, полученных при облучении коллоидного раствора наночастиц золота лазерным излучением с наносекундными длительностями импульсов. В частности, наблюдается смещение основного максимума функции распределения частиц в область меньших размеров, а также появление нового, более узкого максимума, соответствующего малым размерам частиц. Кроме того, при достаточно длительном облучении коллоидного раствора и/или высокой пиковой интенсивности лазерного пучка на входе в раствор пик распределения на больших размерах полностью исчезает, и остается лишь пик в области малых размеров. Показано, что при концентрации частиц в растворе (10^{12}-10^{13} см$^{-3}$), которая достигалась в данных экспериментах, преобладает фрагментация

частиц. Кроме того, было предположено, что фрагментация частиц происходит путем отделения от наночастицы другой частицы меньшего размера.

С учетом данных, полученных при анализе экспериментальных результатов, построена математическая модель, в основе которой лежит кинетическое уравнение, описывающее динамику функции распределения наночастиц по размерам при их облучении. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1.

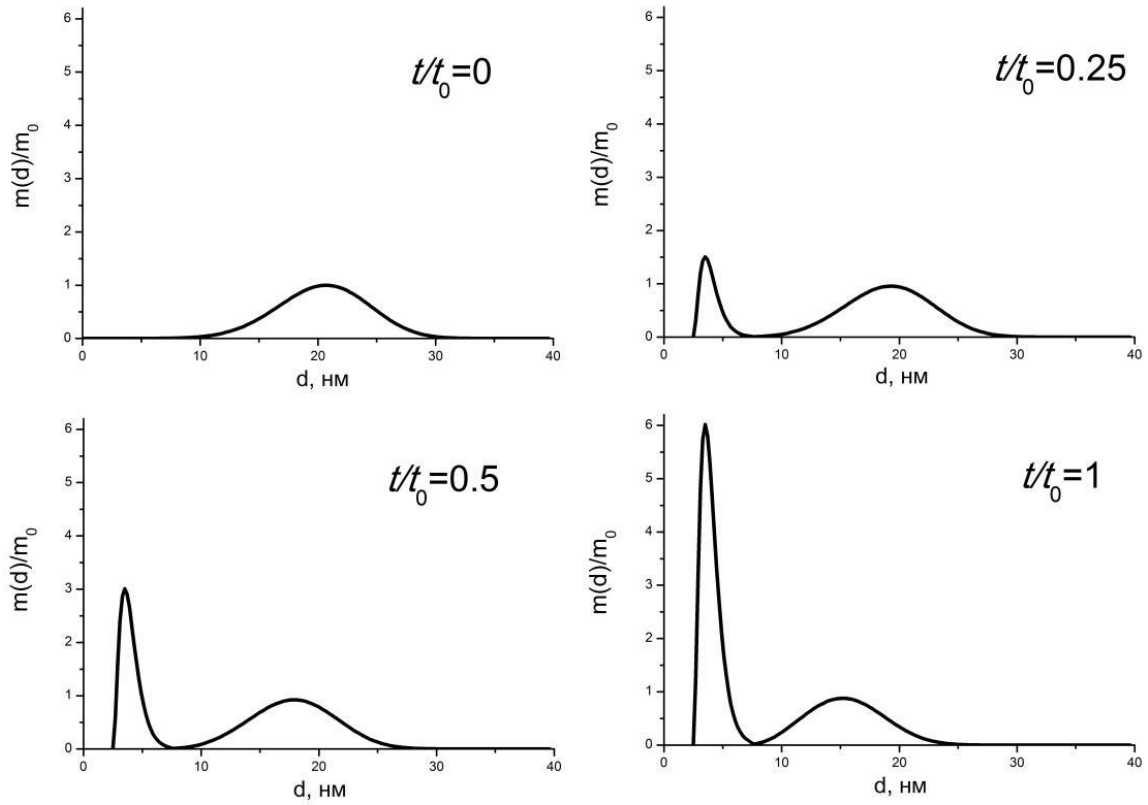

Рис. 1. Функция распределения наночастиц золота по диаметрам $m(d)$ в различные моменты времени, полученная в результате численного моделирования

Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов показывает, что допущения, принятые при построении модели, оправданы и позволяют удовлетворительно описать динамику фрагментации наночастиц в коллоидном растворе при его лазерном облучении.

<u>В третьей главе</u> исследуется фрагментация частиц алюминия, индуцированная пикосекундным лазерным излучением. Характерный размер исходных частиц в растворе составлял 0.5÷10 мкм, концентрация раствора – 10^{13} см$^{-3}$. Важной особенностью результатов экспериментов является появление дополнительного пика в распределении (140 нм), что может быть обусловлено

фрагментацией крупных частиц алюминия (0.5÷10 мкм). Оценки частоты столкновений частиц в растворе при заданной концентрации показывают, что агломерация частиц не вносит существенный вклад в изменение функции распределения частиц.

В условиях экспериментов возможны различные механизмы фрагментации. Первый из них – деление частицы пополам подобно жидкой капле. Второй механизм – отделение мелких фрагментов. В свою очередь, деление частицы может быть связано с воздействием окружающей среды: расплавленная капля может осциллировать с некоторой частотой $\nu \sim \sqrt{\sigma/\rho r^3}$ (r – радиус частицы, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкого алюминия, ρ – плотность) под воздействием окружающей каплю жидкости и, при достаточно сильном воздействии, — делиться. Другой вероятный механизм состоит в возникновении рэлеевской неустойчивости заряженной расплавленной частицы.

Для построения уравнения для функции распределения наночастиц по размерам использовался подход, описанный в Главе 1.

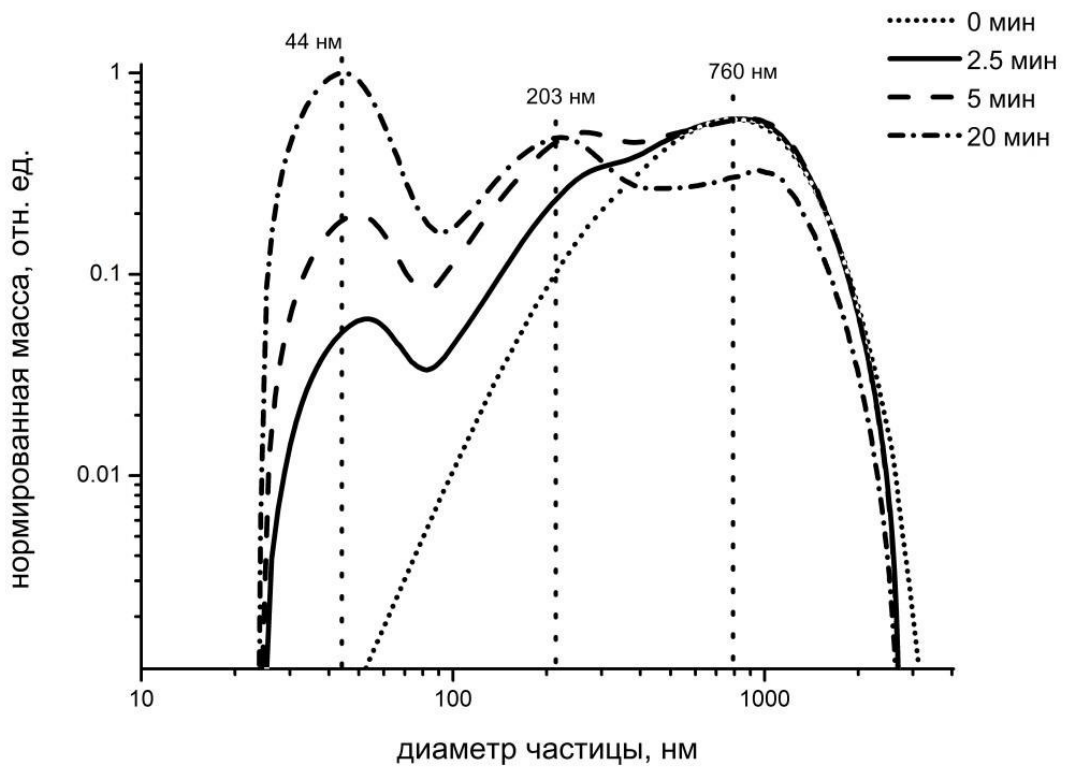

Рис. 2. Эволюция функции распределения частиц алюминия, полученная с помощью численного моделирования, полученная в результате численного моделирования

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 2, и их сопоставление с экспериментом показали, что после облучения в течение характерного времени (t_1 ~ 20 мин) возникающий в распределении дополнительный максимум на 140 нм образуется путем деления пополам более крупных частиц.

В четвертой главе производился анализ результатов эксперимента, в ходе которого наблюдалась агломерация наночастиц золота в жидкости под действием пикосекундного лазерного излучения при достаточно большой концентрации частиц в растворе ($n > 10^{14}$ см$^{-3}$). На основании теоретических оценок частоты столкновения частиц в растворе сделан вывод о наличии дополнительного механизма, приводящего к резкому – взрывообразному - росту концентрации частиц крупных размеров и соответствующему смещению функции распределения частиц по размерам.

Было предположено, что данное ускорение роста концентрации можно объяснить наличием гидродинамической силы Бьёркнессов — взаимодействия между парогазовыми оболочками вокруг нагретых наночастиц в области локализации лазерного пучка.

Составлена система уравнений, описывающая динамику ансамбля частиц.

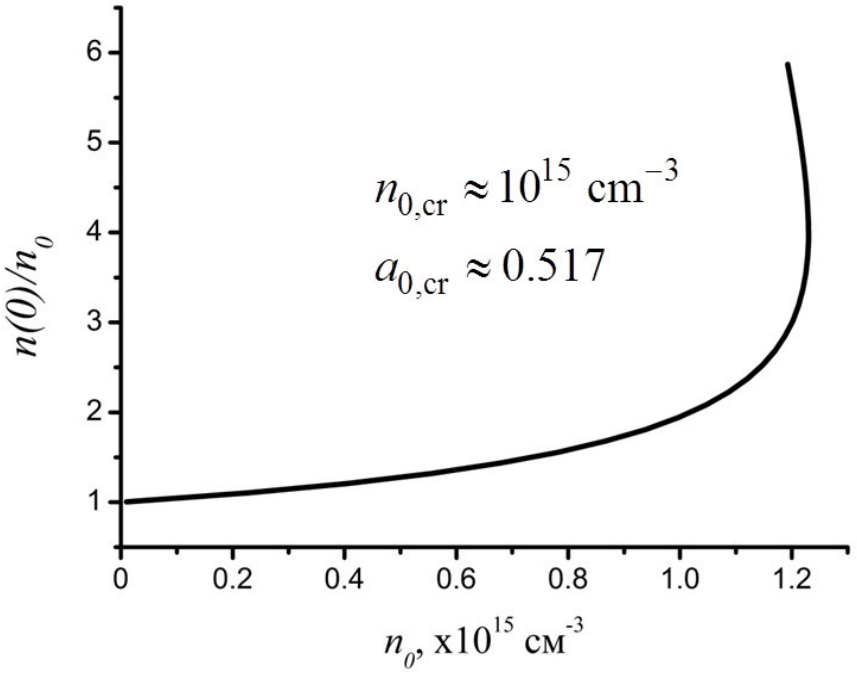

Рис. 3. Зависимость нормированного соотношения концентрации частиц на оси к начальной концентрации $n(0)/n_0$ от начальной концентрации n_0

Получено критическое значение концентрации частиц $n_{cr} = 1.23 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, при превышении которого происходит резкое, взрывообразное ускорение процессов слипания (рис. 3). Показано, что в результате рассматриваемого механизма притяжения происходит существенное возрастание концентрации частиц в приосевой области кюветы (рис. 4).

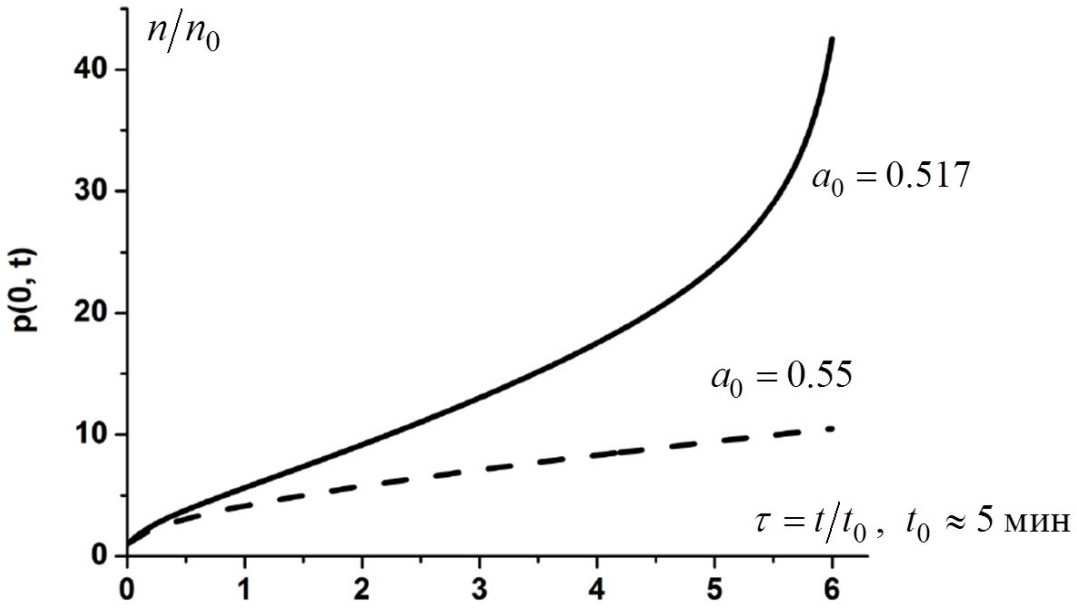

Рис. 4. Временная зависимость нормированной концентрации частиц $p(0, t)$ на оси пучка для двух значений параметра a_0

Проведено сопоставление результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными.

В пятой главе был предложен новый подход к моделированию динамики функции распределения частиц по размерам под действием лазерного излучения.

Анализ экспериментальных данных и результаты, описанные в Главе 2, показывают, что в результате облучения коллоидного раствора наночастиц золота (концентрация частиц ~10^{12}–10^{13} см$^{-3}$) наносекундным лазерным излучением происходит их фрагментация с образованием фрагментов с размерами порядка нескольких нанометров. Этот факт проявляется в том, что в функции распределения частиц по размерам возникает дополнительный максимум на малых размерах (5–10 нм), ширина которого слабо меняется в ходе процесса. Происходит лишь уменьшение амплитуды исходного максимума.

В зависимости от параметров излучения, типа среды и характеристики наночастиц, как отмечалось ранее, могут реализоваться различные механизмы фрагментации. Так, в частности, в случае коротких импульсов излучения (пико и фемтосекунды) и высокой пиковой интенсивности ($I > 10^9$ Вт/см^2) наиболее вероятен взрывной механизм. В случае крупных частиц (микрометры) и материала с невысокой температурой плавления (алюминий, пикосекунды) частицы делятся пополам.

В Главе 2 и 3 использовалась математическая модель, основанная на решении кинетического уравнения для функции распределения частиц по размерам, куда входила величина, связанная с вероятностью процесса фрагментации частиц. Данная величина явным образом зависит от механизма фрагментации и от различных характеристик, поэтому его подбор является сложной задачей.

В Главе 5 предложен другой подход, основанный на использовании уравнения переноса в фазовом пространстве размеров частиц. В условиях рассматриваемого эксперимента частицы можно разделить на две фракции – «большие» (~30 нм) и «малые» частицы (область локализации размера ~ 10 нм).

Согласно модели в результате фрагментации с единицы поверхности «большой» частицы в единицу времени отделяется j «малых», объёмом υ_2 каждая, в результате чего за это же время положение «большой» частицы на оси υ смещается в сторону малых объёмов на $jS\upsilon_2$ (рис. 5).

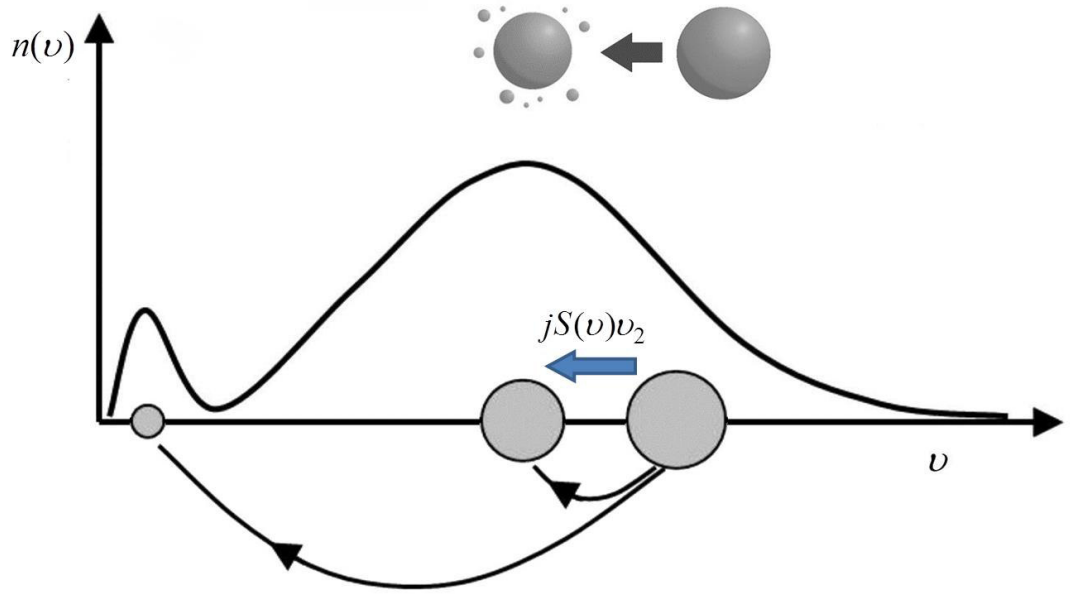

Рис. 5. Абляция «больших» частиц (более 20 нм)

Этот подход позволяет записать уравнение непрерывности (уравнение переноса), которое решается с соответствующими начальными и граничными условиями. Наблюдаемое распределение есть суперпозиция функций распределения фракций «больших» и «малых» частиц.

Предложенная математическая модель, основанная на уравнении переноса в «пространстве» размеров частиц, предлагает более удобный подход для описания поведения функции распределения наночастиц в жидкости и позволяет выявить универсальные закономерности. Этот подход позволяет также выделить существенные параметры, управляющие динамикой процесса.

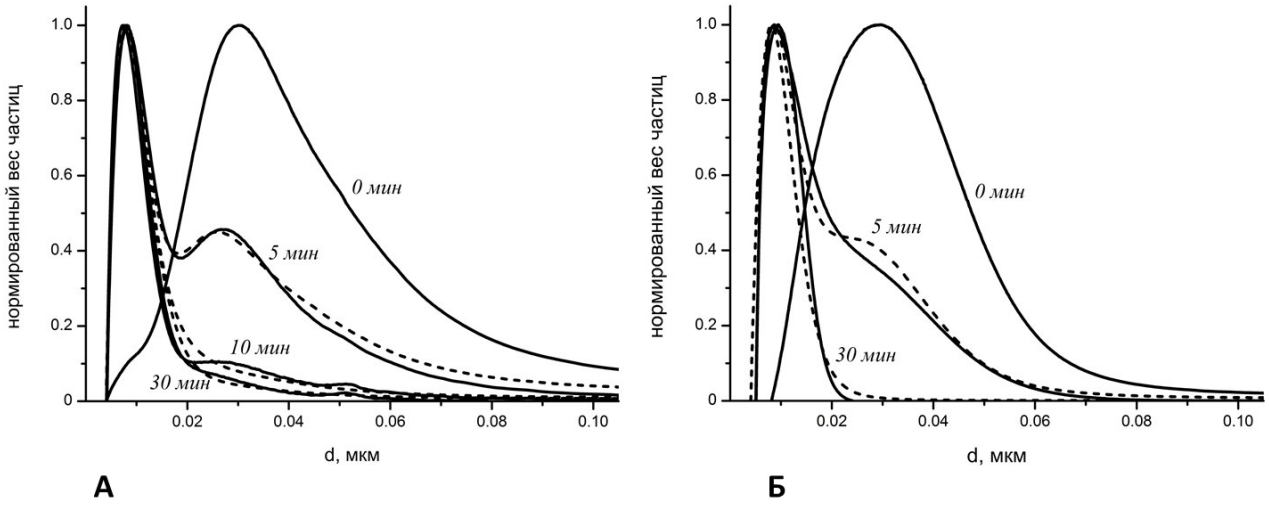

Рис. 6. Функция распределения наночастиц золота (А) и серебра (Б) по размерам в различные моменты времени: сплошная кривая – результаты эксперимента, пунктирная кривая - результаты численного моделирования

Результаты моделирования (Рис. 6) находятся в хорошем согласии с экспериментом. Предложенная модель позволяет достаточно просто учитывать различные факторы, способные повлиять на динамику процесса, такие как внешние поля, пространственная неоднородность области лазерного воздействия и т.д.

В Главе 5 проведена также оценка роли обратного процесса — дефрагментации, которая может возникать вследствие увеличения концентрации «малых» частиц за счет фрагментации «крупных» и соответствующего возрастания частоты их столкновений.

Показана возможность постановки обратной задачи — нахождение по известным экспериментальным данным зависимости темпа абляции частиц от

их размера. Данная информация может быть использована для выявления механизмов лазерной абляции частиц в жидкости в различных условиях.

В заключении приведены основные результаты работы и обсуждаются возможности их практического применения.

3. Основные результаты работы

1. Разработана математическая модель, в основе которой лежит кинетическое уравнение для функции распределения частиц по размерам, учитывающая процессы фрагментации и дефрагментации.

2. Показано, что под действием наносекундного лазерного излучения на коллоидный раствор наночастиц с размерами $r < 100$ нм с невысокой концентрацией (10^{12}-10^{13} см$^{-3}$) основным процессов является фрагментация с отделением частиц размером порядка нескольких нанометров от более крупных, тогда как обратный процесс – слипание – роли практически не играет.

3. Крупные частицы алюминия ($r \sim 0.5 \div 10$ мкм) при облучении пикосекундными импульсами фрагментируются преимущественно путем деления пополам подобно жидкой капле.

4. Впервые предложен и обоснован механизм ускоренной агломерации металлических частиц в коллоидном растворе под действием пикосекундного лазерного излучения, обусловленный возникновением гидродинамической силы Бьёркнессов, т.е. взаимодействием между парогазовыми оболочками вокруг нагретых наночастиц в области локализации лазерного пучка.

5. Уравнение переноса в пространстве размеров было впервые применено к задаче о динамике функции распределения металлических наночастиц под действием лазерного излучения и показано, что может количественно описывать наблюдаемую в эксперименте эволюцию.

Цитируемая в автореферате литература

1. С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук, Избранные задачи теории лазерной абляции, УФН, 172(3), 301-333 (2002).
2. G.A. Shafeev, Formation of Nanoparticles Under Laser Ablation of Solids in Liquids, in: Laser Ablation in Liquids, Principles ans Applications in the Preparations of Nanomaterials, Guowei Yang, Ed., Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore,pp. 327-391.
3. F. Viñes, J. R. B. Gomes, F. Illas, Understanding the reactivity of metallic nanoparticles: Beyond the extended surface model for catalysis, Chem. Soc. Rev., 43, 4922−4939, (2014).
4. J.A. Scholl, A.L. Koh, J.A. Dionne, Quantum plasmon resonances of individual metallic nanoparticles, Nature, 483, 421−427 (2012).
5. D.L. Fedlheim, C.A. Foss, Metal Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Applications; CRC Press: Boca Raton, FL, 2001.
6. J. Anker, W. Hall, O. Lyandres, N. Shah,J. Zhao, R. Van Duyne, Biosensing with plasmonic nanosensors. Nat. Mater., 7, 442−453 (2008).
7. K. Lee, M. El-Sayed, Gold and silver nanoparticles in sensing and imaging: Sensitivity of plasmon response to size, shape, and metal composition. J. Phys. Chem. B, 110, 19220−19225 (2006).
8. I. Brigger, C. Dubernet, P. Couvreur, Nanoparticles in cancer therapy and diagnosis, Advanced Drug Delivery Reviews, 64, 24-36 (2012).
9. M.S. Sibbald, G. Chumanov, T.M. Cotton, Reduction of Cytochrome c by Halide-Modified, Laser-Ablated Silver Colloids, J. Phys. Chem., 100(11), 4672-4678 (1996).
10. M. Procházka, P. Mojzeš, J. Štěpánek, B. Vlčková, P.-Y. Turpin, Probing Applications of Laser Ablated Ag Colloids in SERS Spectroscopy: Improvement of Ablation Procedure and SERS Spectral Testing, Anal. Chem., 69, 5103 (1997).
11. F. Mafuné, J.-Y. Kohno, Y. Takeda, T. Kondow, and H. Sawabe, J. Phys. Chem., B105, 5144 (2001).
12. A. Takami, H. Yamada, N. Nakano, S. Koda, Size Reduction of Silver Particles in

Aqueous Solution by Laser Irradiation, Jpn. J. Appl. Phys., Part2 35(6B), L781-L783 (1996).

13. A. Takami, H. Kurita, S. Koda, Laser-Induced Size Reduction of Noble Metal Particles, J. Phys. Chem. B, 103, 1226-1232 (1999).
14. E. Akman, O.C. Aktas, B. Genc Oztoprak, M. Gunes, E. Kacar, O. Gundogdu, A. Demir, Fragmentation of the gold nanoparticles using femtosecond Ti:Sapphire laser and their structural evolution, Optics & Laser Technology, 49, 156-160 (2013).
15. P.V. Kamat, M. Flumiani, G.V. Hartland, Picosecond Dynamics of Silver Nanoclusters. Photoejection of Electrons and Fragmentation, J.Phys.Chem.B, 102(17), 3123-3128 (1998).
16. S. Link, C. Burda, M.B. Mohamed, B. Nikoobakht, M.A. El-Sayed, Laser Photothermal Melting and Fragmentation of Gold Nanorods: Energy and Laser Pulse-Width Dependence, J. Phys. Chem. A, 103(9), 1165-1170 (1999).
17. D. Werner, A. Furube, T. Okamoto, S. Hashimoto, Femtosecond Laser-Induced Size Reduction of Aqueous Gold Nanoparticles: In Situ and Pump-Probe Spectroscopy Investigations Revealing Coulomb Explosion, J. Phys. Chem. C, 115, 8503-8512 (2011).
18. H. Usui, T. Sasaki, N. Koshizaki, Optical Transmittance of Indium Tin Oxide Nanoparticles Prepared by Laser-Induced Fragmentation in Water, J. Phys. Chem. B 110, 12890-12895 (2006).
19. A. Plech, V. Kotaidis, M. Lorenc, J. Boneberg, Femtosecond laser near-field ablation from gold nanoparticles, Nat. Phys., 2, 44-47 (2006).
20. Ф. Бозон-Вердюра, Р. Брайнер, В.В. Воронов, Н.А. Кириченко, А.В. Симакин, Г.А. Шафеев, Образование наночастиц при лазерной абляции металлов в жидкостях, Квантовая электроника, 33(8), 714 (2003).
21. K. Kimura, Photoenhanced van der Waals Attractive Force of Small Metallic Particles, J. Phys. Chem., 98, 11997-12002 (1994).
22. D. Werner, S. Hashimoto, T. Tomita, S. Matsuo, Y. Makita, In-Situ Spectroscopic Measurements of Laser Ablation-Induced Splitting and Agglomeration of Metal Nanoparticles in Solution, J. Phys. Chem. C, 112, 16801-16808, (2008).

23. H. Hasegawa, N. Satoh, K. Tsujii, K. Kimura, Z. Phys., D20, 325 (1991).
24. H. Eckstein, U. Kreibig, Light induced Aggregation of Metal Clusters, Z. Phys., D26, 239 (1993).
25. A. Pyatenko, H. Wang, N. Koshizaki, Growth Mechanism of Monodisperse Spherical Particles under Nanosecond Pulsed Laser Irradiation, J. Chem. Phys. C, 118, 4495-4500 (2014).
26. A.A. Serkov, E.V. Barmina, P.G. Kuzmin, G.A. Shafeev, Self-assembly of nanoparticles into nanowires under laser exposure in liquids, Chem. Phys. Lett., 623, 93-97 (2015).

Список публикаций автора по теме диссертации

1. N.A. Kirichenko, **M.E. Shcherbina**, A.A. Serkov, I.I. Rakov Transfer equation for the description of the dynamics of Au nanoparticle ensemble in liquid under pulsed laser irradiation, Applied Surface Science, 376, 180-187 (2016)
2. Н.А. Кириченко, **М.Е. Щербина**, А.А. Серков, И.И. Раков Уравнение переноса в задаче о функции распределения наночастиц в жидкости под действием лазерных импульсов, Квантовая электроника, 45(12), 1161-1165 (2015).
3. A.A. Serkov, **M.E. Shcherbina**, P.G. Kuzmin, N.A. Kirichenko Laser-induced agglomeration of gold nanoparticles dispersed in a liquid, Applied Surface Science, 336, 96-102 (2015).
4. P.G. Kuzmin, G.A. Shafeev, A.A. Serkov, N.A. Kirichenko, **M.E. Shcherbina** Laser-assisted fragmentation of Al particles suspended in liquid, Applied Surface Science, 294, 15-19 (2014).
5. Н.А. Кириченко, И.А. Сухов, Г.А. Шафеев, **М.Е. Щербина** Эволюция функции распределения наночастиц Au в жидкости под действием лазерного излучения, Квантовая электроника, 42(2), 175-180 (2012).
6. И.А. Сухов, **М.Е. Щербина** Особенности генерации наночастиц методом лазерной абляции в жидкости, Труды 55-й научной конференции МФТИ, 111-112 (2012).
7. **М.Е. Щербина**, И.А. Сухов, Н.А. Кириченко, Г.А. Шафеев Динамика функции распределения наночастиц Au в жидкости под действием лазерного излучения, Труды 54-й научной конференции МФТИ, 48-49, (2011).