

Градов Владимир Михайлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЕ
РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ С РАЗРЯДНЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



Москва - 2002

Владимир Михайлович Градов

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Лебедев Ю.А. доктор физико-математических наук

Назаренко И.П. доктор технических наук, профессор

Хвесьюк В.И. доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Институт проблем механики РАН

Защита состоится «3» июня 2002 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д.212.141.08 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 234.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская
теному секретарю диссертационного

1 мая 2002 года.

1583 087



Копос:

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Системы, рассматриваемые в диссертации, могут быть идентифицированы с приборами квантовой электроники, облучательными установками, устройствами светотехники, имитаторами излучений различной физической природы, установками радиационного нагрева, бортовыми генераторами световых импульсов и другими видами техники. В системах в качестве источников селективного излучения используются электрические разряды дугового типа в инертно- и металлогазовых плазмообразующих средах, стабилизированные прозрачной цилиндрической оболочкой.

Актуальность работы. Особенность указанных систем состоит в ключевой роли радиационного воздействия как определяющего фактора их функционирования, а важнейшей проблемой является обеспечение эффективной генерации и использования излучения определенного спектрального диапазона, т.е. проблема энергетической эффективности устройств. Наибольшую остроту данный вопрос имеет в таких областях, как лазерная техника, осветительное приборостроение, облучательная техника. Связано это с тем, что применяемые здесь приемники лучистой энергии обладают, как правило, узкими спектральными диапазонами поглощения (чувствительности), и широкополосное излучение источников воспринимается облучаемой средой далеко не полностью. Кроме того, нетривиальной оказывается задача энергетически выгодной организации процессов в наиболее сложном варианте объемного поглощения излучения приемником, например, активной средой лазеров. Наконец, из-за большого количества различных поглощающих сред приходится сталкиваться с ситуацией, когда имеют место значительные непроизводительные потери энергии в канале радиационного взаимодействия излучателя и приемника. Таким образом, при построении рассматриваемых систем и источников излучения необходимо обеспечивать, с одной стороны, заданный спектральный состав лучистых потоков, а с другой – эффективное использование излучения при минимальных потерях в светооптической системе. Вместе с тем известно, что физика процессов в системах на базе разрядной селективно излучающей низкотемпературной плазмы, во многом определяющей характеристики всей системы, достаточно сложна, тем более, что источник излучения в составе системы находится под воздействием собственной многократно отраженной радиации, и его характеристики могут заметно меняться по сравнению с таковыми вне системы. В результате оказывается, что чисто экспериментальное или полуэмпирическое исследование всех аспектов функционирования рассматриваемых установок малопродуктивно. Сложной и дорогой является процедура изучения экстремальных режимов работы устройств, а ряд их характеристик в силу замкнутости систем весьма затруднительно измерить. В этой ситуации возрастает роль расчетно-теоретического анализа, и особую актуальность приобретает задача разработки методов и компьютерных средств расчета, построенных при максимальном учете деталей физических процессов, протекающих в плазме и дру-

гих элементах приборов, с обязательным рассмотрением их в естественной взаимосвязи и ориентированных на проведение полномасштабных вычислительных экспериментов.

В последние годы в связи с развитием лазерной техники, МГД- и термоэмиссионных методов преобразования энергии, ряда актуальных направлений светотехники и плазмодинамических технологий были достигнуты впечатляющие успехи в области физики и техники селективно излучающей плазмы и энергетики использующих ее систем. Значительная роль в этом принадлежит научным школам и творческим коллективам ОИВТ РАН, ГОИ им. Вавилова, НИИ «Зенит», ФИАН им. Лебедева, ИОФ РАН, ИПМ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГАИ, МГУ, МГЭИ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и др., а также ряда зарубежных фирм и лабораторий, в том числе, Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоуренса (США), исследовательских центров ведущих электротехнических концернов: «General Electric», «Silvania» США, «Osram» Германия, «Iwasaki» Япония и др.

Однако проблематика повышения энергетической эффективности рассматриваемых в диссертации систем далеко не исчерпана. Не до конца исследованы различные каналы потерь энергии в многочисленных элементах систем, требуют более тщательного анализа механизмы теплового воздействия на оболочки ламп и особенности работы источников в составе систем, недостаточно изучены разнообразные аспекты использования плазмы в качестве эффективного трансформатора излучения разных спектральных диапазонов, остаются открытыми вопросы управления спектром излучения разрядов и другие вопросы функционирования установок, не говоря уже об оптимизации их многочисленных параметров и режимов работы.

Следует отметить, что комплексное моделирование процессов в системах с селективно излучающей плазмой сдерживается недостаточной разработанностью вычислительных моделей с соответствующим программно - методическим и информационным обеспечением, которые удовлетворяли бы критериям замкнутости и реалистичности описания взаимосвязанных нелинейных физических процессов в плазме и влияющей на нее системе при одновременном учете тонких деталей спектральных распределений и различных проявлений неравновесности в пространственно неоднородном плазменном объеме и при всем том допускали бы эффективную реализацию на серийной вычислительной технике, принимая во внимание большой объем счетной работы для такого класса задач.

Цель и задачи работы. Целью работы является создание на основе компьютерных технологий замкнутых методов расчета взаимосвязанных теплофизических процессов в приборах и установках с разрядными источниками объемного селективного излучения при доминирующей роли радиационного переноса, и исследование многоступенчатого процесса преобразования энергии в данных устройствах для определения способов повышения их энергетической эффективности. Созданное программно-математическое обеспече-

ние предназначено для решения конкретных научных и практических вопросов разработки новейшей техники.

Основные задачи, рассматриваемые в диссертации:

1. Разработка методов и алгоритмов расчета переноса излучения сложного спектрального состава в многоэлементных системах с учетом реальных спектральных зависимостей оптических характеристик их элементов и особенностей работы плазменного источника объемного излучения в составе систем.
2. Создание вычислительных моделей и методов расчета теплофизических характеристик сильно излучающих разрядов различного типа с учетом реального состояния плазмы в стационарных и нестационарных режимах и влияния системы на разряд.
3. Разработка методологии и компьютерных средств формирования базы данных по элементарным процессам в плазме, термодинамическим, теплофизическим и оптическим свойствам плазмообразующих сред в обеспечение информационной поддержки вычислительных экспериментов.
4. Построение комплекса компьютерных программ, реализующих разработанные методы и алгоритмы.
5. Применение созданных методов к исследованию технических устройств различного назначения для решения вопросов повышения их энергетических характеристик: лазерных твердотельных излучателей на неодимовых активных средах, систем с источниками видимого света, ИК- и УФ- диапазонов спектра, проверка и обоснование адекватности моделей и используемой методологии.

Научная новизна. В диссертационной работе получены **новые результаты**, развивающие научное направление, связанное с исследованием теплофизических процессов в многоэлементных установках с объемными источниками излучения:

1. Разработаны методы, алгоритмы и программы, реализующие концепцию замкнутого компьютерного моделирования сопряженных теплофизических процессов в системах с пространственно неоднородными объемными генераторами излучения при определяющей роли радиационного теплообмена со сложным спектральным распределением с учетом реальной геометрии и реальных оптических свойств материалов и поверхностей разнородных элементов систем.
2. Предложена и программно реализована базовая модель селективно излучающей неоднородной плазмы разрядов низкого давления с сильной неравновесностью разного типа и на ее основе проведено исследование ртутных ламп для УФ- диапазона спектра.
3. Решена задача по созданию библиотеки моделей и программ, а также банка данных для обеспечения вычислительных экспериментов информацией по оптическим, термодинамическим, кинетическим и транспортным свойствам плазмы. Впервые выполнено систематическое исследование материаль-

ных функций большого числа используемых на практике плазмобразующих сред.

4. На основе методологии численного эксперимента в рамках проблемы повышения КПД лазеров впервые исследованы особенности протекания процессов в едином радиационном поле систем накачки твердотельных лазеров с учетом преобразования энергии в активной среде и ее вывода за пределы устройства. Сформулированы принципы построения конфигураций систем накачки повышенной эффективности.

5. Всесторонне исследована давно поставленная, но до конца не решенная проблема повышения КПД излучения ламп и систем на их основе за счет фильтрации излучения разрядов с помощью интерференционных покрытий. Сформулированы условия, при которых возможно получение заметных эффектов для ламп разного назначения, отмечена проблематичность успешного применения покрытий в системах, которые сами возвращают излучение в разряд, выполняя функцию активного светофильтра.

6. Проведен большой цикл исследований электрофизических и спектрально-энергетических характеристик источников излучения различных классов в широком диапазоне параметров и режимов работы, полученный материал обобщен и проанализирован с единых позиций в сопоставлении с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других авторов и составляет основу для оптимизации характеристик ламп.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. Разработаны методы расчета устройств электронной техники, обеспечивающие проведение комплексных исследований их параметров на основе реалистичного описания теплофизики процессов, осложненных переносом излучения с дискретно-непрерывным спектром, в конфигурации и с характеристиками элементов систем, соответствующих реальным условиям их работы.

2. Получен комплекс данных о взаимосвязанных физических процессах в элементах замкнутых систем с объемными излучателями, отражающий особенности функционирования таких систем. Сформулированы условия и принципы конфигурирования систем накачки, позволяющие наиболее полно реализовать потенциал ламп накачки с точки зрения повышения КПД лазера. Расчетные данные подтверждены прямыми экспериментами с лазерными излучателями специальных конструкций.

3. Построена система информационного оснащения численных экспериментов необходимыми свойствами плазмы, позволяющая проводить замкнутые расчеты устройств и оптимизацию их параметров и режимов работы, а также поисковые исследования и имеющая самостоятельное научное значение в рассматриваемой научно-технической области.

4. Количественно установлен уровень требований к оптическим свойствам элементов систем, сбалансированность которых важна для реализации высоких КПД преобразования энергии.

5. В результате проведенных разработок физических и математических моделей, методов расчета и реализующего их программного обеспечения заложены основы систем автоматизации научных исследований и проектирования изделий в областях науки и производства, в которых излучение сложного спектрального состава является фактором технологического процесса, например, в квантовой электронике, облучательной технике, светотехнике и т.д.

Созданный программный комплекс апробирован в условиях опытного производства изделий электронной техники. Он применялся при разработке ряда установок и приборов в ходе выполнения около двух десятков НИР и ОКР оборонного и гражданского назначения в соответствии с планами НПО “Зенит”, СКТБ “Ксенон”, НИИ ПММ, НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты диссертационной работы находят применение в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке аспирантов, магистров и бакалавров.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и совещаниях:

на IV (Киев, 1975 г.), V (Киев, 1979 г.), VI (Ленинград, 1983 г.), VII (Ташкент, 1987 г.) и VIII (Минск, 1991 г.) Всесоюзных конференциях по физике низкотемпературной плазмы, VII (Алма-Ата, 1977 г.) Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы, IV Всесоюзной конференции по радиационному теплообмену (Киев, 1978 г.), VI Всесоюзной конференции “Оптика лазеров” (Ленинград, 1990 г.), Международном семинаре “Светотехника” (Москва, 1992 г.), II (Суздаль, 1995 г.) и III (Новгород, 1997 г.) Международных Светотехнических конференциях, X Юбилейной (Переславль-Залесский, 1999 г.) и XI (Москва, 2001г.) Международных конференциях по вычислительной механике и современным прикладным программным средствам, III Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (Истра-Москва, 2000 г.), X Всероссийской конференции по физике газового разряда (Рязань, 2000 г.), на объединенном научном семинаре кафедры «Плазменные энергетические установки» и НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На защиту выносятся:

- вопросы разработки расчетно-теоретических методов и комплекса моделей для исследования процессов в системах, функционирование которых существенным образом связано с использованием излучения разрядной плазмы со сложным составом спектральных компонент;
- методы построения базы данных по термодинамическим, оптическим и теплофизическим характеристикам плазмы для информационного оснащения указанных моделей и результаты систематических исследований свойств большого числа плазмообразующих сред, применяемых в источниках излучения;

- программно-математическое обеспечение, позволяющее выполнять компьютерные эксперименты в режиме замкнутого реалистичного описания взаимосвязанных физических явлений в плазме и других элементах систем;
- результаты исследования характеристик устройств и источников излучения различного типа и назначения и способов повышения их энергетической эффективности.

Личное участие автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в непосредственном их выполнении, руководстве исследованиями или равноправном участии в постановке задач, разработке методов решения, алгоритмов, компьютерных программ, проведении численных экспериментов и интерпретации полученных результатов. В итоге он внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертации.

Структура работы. Диссертация изложена на 323 страницах, содержит 97 рисунков, 6 таблиц и состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы из 330 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна полученных результатов, показана практическая ценность работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 дается общая характеристика объекта исследования, формулируется замкнутая модель процессов в системах сложной геометрии с объемными пространственно неоднородными источниками излучения, описан состав комплекса разработанных математических моделей.

Технические устройства, рассматриваемые в диссертации, представляют собой системы, включающие один или несколько разрядных источников излучения и светотехническое оборудование, обеспечивающее концентрацию лучистой энергии на приемнике излучения. Представители различных систем приведены на рис. 1.1-1.3. Они обладают в общем случае достаточно сложной конфигурацией и включают наряду с источниками излучения многочисленные другие элементы: отражатели и контротражатели, моноблоки, различные приемники излучения (например, активные стержни или плиты лазеров) и т.д. Применяемые материалы имеют оптические характеристики, существенно зависящие от длины волны излучения, поверхности элементов могут быть отражающими, преломляющими, а среды-излучающими, поглощающими и рассеивающими, отражение носит диффузный, зеркальный или смешанный диффузно-зеркальный характер. Источник излучения состоит из разрядной трубки, заполненной плазмообразующей средой, и, возможно, тракта жидкостного или воздушного охлаждения (рис.1.3.).

Центральное место в рассматриваемых системах принадлежит разрядной плазме, которая служит источником мощного излучения и во многом определяет характеристики всей системы. Излучение имеет сложный спектральный состав, плазма неоднородна по объему, слабонеидеальна и ее состояние может сильно отличаться от равновесного. Радиационное поле сис-

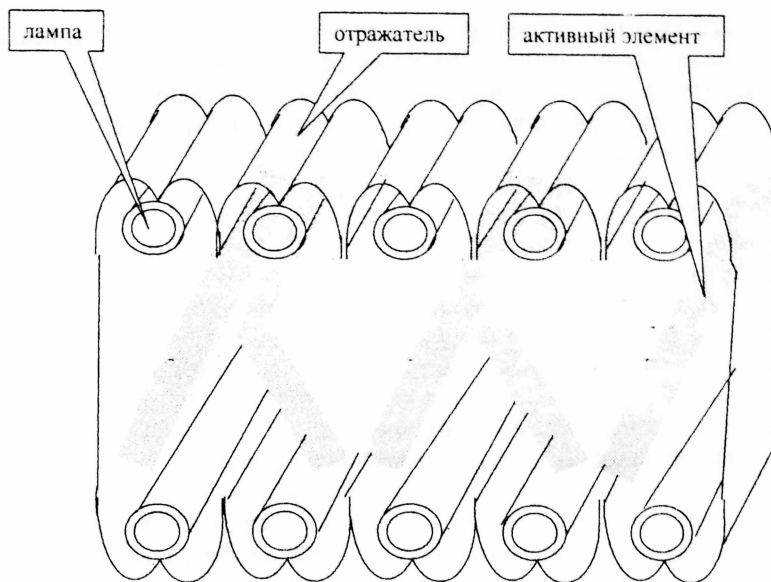


Рис. 1.1. Система накачки с дисковыми активными элементами

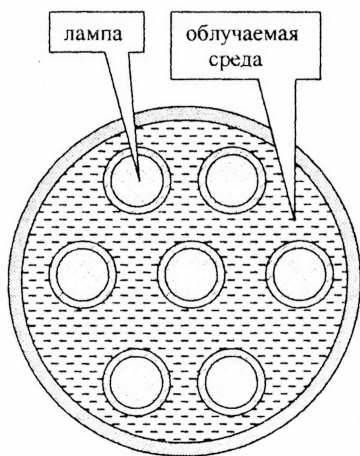


Рис. 1.2. Установка объемного фотохимического действия

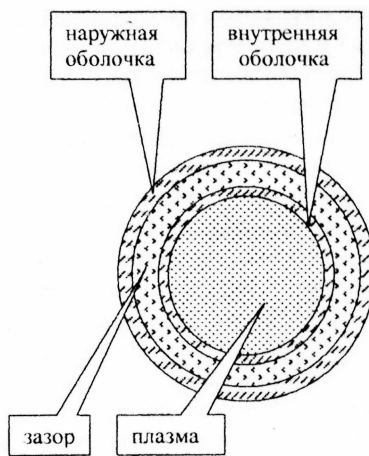


Рис. 1.3. Лампа с системой излучающих оболочек

темы оказывает заметное влияние на развитие процессов в плазме. В реальных конструкциях излучение разряда после многократных отражений частично возвращается в плазму и в какой-то степени поглощается ею, а затем снова переизлучается, вообще говоря, уже на других длинах волн. В результате спектрально-энергетические характеристики источника излучения в системе и вне системы могут сильно отличаться.

В работе исследуются разряды трех типов: высокого, среднего и низкого давлений с Xe , Kг , Ag, Hg, Na, K, Rb, Cs - плазмообразующими средами. В нестационарных режимах длительность импульса тока составляет сотню микросекунд и выше. Состояние плазмы в первых двух типах разрядов близко к локальному термодинамическому равновесию (ЛТР). Физика процессов в неравновесной селективно излучающей неоднородной плазме низкого давления чрезвычайно сложна. В плазме присутствует как минимум три сорта частиц: электроны, ионы и атомы. В формировании спектров излучения значительная роль принадлежит линиям атомов, находящихся в различных возбужденных состояниях с распределением весьма далеким от максвелловского, компонентный состав плазмы сильно отличается от равновесного, а распределение электронной компоненты по скоростям теплового движения - от максвелловского. Кроме того, из-за низкой частоты упругих столкновений сильно различаются температуры легких и тяжелых частиц. В установлении распределения частиц по уровням энергии важная роль принадлежит излучению, в том числе и возвращаемому в разряд системой.

Указанные особенности систем учитываются при разработке соответствующих математических моделей. При построении модели радиационного переноса в системах сложной геометрии целесообразно представить последнее, абстрагируясь от конкретного назначения их элементов, в виде совокупности излучающих или поглощающих подобластей, характеризующихся спектральными коэффициентами поглощения, преломления и усиления, а в случае плазмы - еще и теплофизическими характеристиками. Реальные поверхности, ограничивающие подобласти, аппроксимируются при этом поверхностями первого и второго порядков и наделяются свойствами отражения (зеркально, диффузно) или преломления излучения. Существенно, что в этой модели система может присутствовать в виде своего оптического аналога.

Моделирование переноса излучения осуществляется посредством слежения за прохождением по системе выделенной порции лучистой энергии, называемой «фотоном» (или квантом энергии), обладающим частотой и энергетическим весом, до его полного поглощения в системе или ухода из нее. В общем случае каждый квант испускается элементарными объемами каждой из излучающих подобластей, а поглощается или усиливается всеми остальными. Фиксируя место поглощения испущенного кванта можно по итогам обработки большой группы квантов найти распределение лучистой энергии по элементам системы. Затем, используя соответствующие модели процессов в элементах, выполнить итерацию по расчету параметров разряда

и других элементов системы и вновь повторить розыгрыш «фотонов». Данная процедура применительно к плазме разрядов оказывается чрезвычайно трудоемкой и требует значительных ресурсов вычислительной техники. Поэтому в настоящей работе розыгрыш квантов излучения разряда осуществляется с его поверхности, а расчет дивергенции лучистого потока в плазме проводится на основе точного уравнения переноса и различных его приближений. При этом поглощенная в разряде мощность, найденная в ходе моделирования распространения радиации в системе, используется для определения плотности результирующего потока излучения, фигурирующего в граничном условии для уравнений переноса излучения в плазме.

Совокупность математических моделей, разработанных для реализации изложенного подхода к расчету систем можно условно разбить на четыре группы: модели распространения монохроматического излучения в системе сред и поверхностей, образуемых элементами устройств, модели переноса излучения в излучающих элементах систем, модели состояния плазмы в разных режимах и при различных электрических, энергетических и физических параметрах разряда и, наконец, замыкающие весь перечисленный комплекс модели процессов в приемнике излучения (конкретизация проведена для активной среды твердотельных лазеров). При постановке вычислительных экспериментов, призванных отразить реальное развитие процессов в исследуемых объектах, решающая роль принадлежит информационному обеспечению моделирования. Соответствующие вопросы обсуждаются в главе 4.

Глава 2 посвящена разработке моделей радиационного переноса в сложной конфигурации элементов систем и в излучающих средах произвольной оптической плотности. Рассматривается решение задачи о радиационном возбуждении резонансных уровней энергии.

Модель распространения монохроматического излучения в системе имеет следующую конкретную реализацию. На рис.2.1 особенности метода иллюстрируются на примере системы накачки твердотельного лазера с одной лампой и четырьмя активными элементами (АЭ), размещенными в каналах кварцевого моноблока. Дуга окружности поперечного сечения столба разряда длиной $2\pi Rq$ разбивается на N_V равномерно размещенных по окружности точек, где q - часть поперечного сечения разряда, попавшая в оптический аналог. Из каждой точки, как из центра, строится веер N равномерно распределенных по полусфере лучей (рис. 2.1,б). По каждому направлению веера выпускается поочередно N_F усредняющих квантов мощности («фотонов») с начальным энергетическим весом $\Delta E_{v0}(\Omega) = I_v(\Omega)/N_F$, где единичный вектор Ω задает направление вылета кванта, а интенсивность излучения рассчитывается по уравнению, являющемуся точным интегралом уравнения переноса излучения. В случае необходимости учета конечной длины системы данная процедура повторяется в нескольких сечениях по длине.

Формально «фотон» представляет собой объект, характеризуемый набором $\{\Phi\} = \{\Delta E_v, \vec{X}, \vec{P}\}$, где $\Delta E_v, \vec{X}, \vec{P}$ - текущий энергетический вес кванта, векторы положения и направления его движения. После старта производится моделирование траектории «фотона» в системе, в ходе которого выполняется последовательный расчет указанного выше набора. Координаты места встречи с поверхностью вычисляются в виде $\vec{X}_i = \vec{X} + \vec{P} \cdot t$, где t - расстояние от точки $\vec{X}$ до ближайшей поверхности в направлении движения.

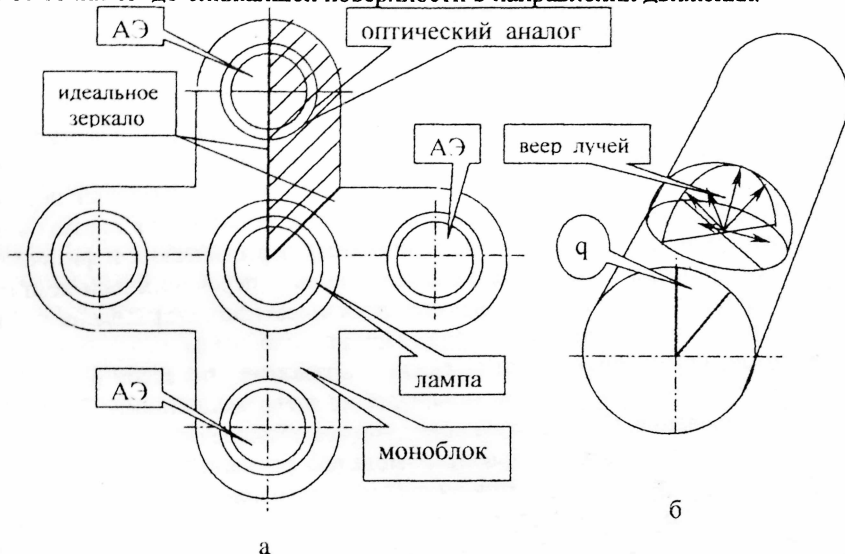


Рис.2.1. Геометрические аспекты модели переноса излучения в системе

При встрече с поверхностью «фотон» может отразиться, поглотиться, преломиться. В случае отражения от зеркальной поверхности новое направление фотона строго определено. При отражении от диффузной поверхности направление отражения случайно и равномерно распределено по полусфере, что алгоритмически реализуется заданием случайных чисел. Пропускающая поверхность может обладать зеркальными или диффузными свойствами отражения и преломления. Судьба «фотона», попавшего на такую поверхность, определяется с помощью операции со случайными числами. Текущий вес «фотона» после прохода поглощающей или усиливающей среды меняется.

Слежение за «фотоном» продолжается до тех пор, пока его текущий вес не уменьшится до задаваемого пользователем значения. После того, как все выпущенные «фотоны» распределятся по элементам системы, может быть проведен расчет температурного поля в разряде. При этом необходимо рассчитывать дивергенцию лучистого потока

$$\text{div} F_v = 4\pi j_v(r) - ck_v(r)U_v, \quad (2.1)$$

где $k_\nu(r)$, r , $j_\nu(r)$, U_ν , F_ν - спектральный коэффициент поглощения плазмы, исправленный на вынужденное испускание, радиус-вектор точки, коэффициент собственного излучения среды на частоте ν , объемная плотность энергии излучения, плотность спектрального потока излучения.

Коэффициент излучения плазмы $j_\nu(r)$ представляется в виде суммы коэффициентов излучения в линиях и в континууме и вычисляется суммированием по всем компонентам плазмы, линиям и уровням энергии. В состоянии ЛТР данный коэффициент определяется по закону Кирхгофа.

Учет переноса излучения в случае реальных спектров даже при наличии ЛТР приводит к известным вычислительным трудностям, возрастающим при расчетах неплоских конфигураций (например, цилиндрических). Эти трудности связаны с необходимостью интегрирования спектральной интенсивности излучения по пространству (углам) и частоте. Методы решения данной задачи развивались в работах многих авторов: В.А. Амбарцумяна, Б. Дэвисона, В.Н. Адрианова, Р.Д. Сэсса и Э.М. Спэрроу, В.Г. Севастьяненко, И.В. Немчинова, В.Я. Гольдина, Б.Н. Четверушкина, С.Т. Суржикова и др.

В настоящей работе перенос излучения в плазме рассматривается двумя методами: на основе непосредственного интегрирования точного уравнения переноса излучения, что для цилиндрической геометрии сопровождается необходимостью решать задачу в трехмерном варианте, и в диффузионном приближении. Для уменьшения погрешности вычислений в диффузионном приближении предлагаются его различные комбинации с точным решением. Для других излучающих сред применяются различные приближения метода сферических гармоник и метод Шварцшильда-Шустера.

Система уравнений диффузионного приближения включает уравнение (2.1) и уравнение для плотности результирующего потока, выражаемого через градиент величины U_ν . Соответствующие граничные условия при расчетах разрядов вне систем формулируются по-разному в зависимости от желаемой точности вычислений. В составе системы, когда имеет место возврат лучистой энергии в разряд, граничные условия при $r=R$ записываются в виде

$$-\frac{c}{3k_\nu} \cdot \frac{dU_\nu}{dr} = F_{\nu c} - F_{\nu p},$$

где $F_{\nu c}$, $F_{\nu p}$ - поверхностные плотности радиальных спектральных потоков собственного излучения плазмы и излучения, поглощенного в разряде в процессе многократных проходов излучения в системе. Данные величины рассчитываются с помощью изложенного выше метода.

Для получения интегральных по спектру характеристик излучения применяется прямое интегрирование по частоте.

При моделировании кинетики заселения уровней энергии возникает задача расчета пленения излучения в линиях с большим коэффициентом поглощения. Обычно в массовых расчетах используют приближенные выраже-

ния для определения вероятности вылета фотона из точек плазменного столба за пределы объема, основанные на решении уравнения Бибермана-Холстейна в рамках модели однородной плазмы и справедливые, строго говоря, для оси цилиндра. Такой подход приводит к заметному упрощению реальной картины явлений. В главе дается анализ известных решений, обсуждаются методы, основанные на численном решении для цилиндрической геометрии точного уравнения переноса излучения, а также в рамках диффузионного приближения, в том числе и с использованием представления Л.М.Бибермана об эффективном времени жизни. При этом форма линии может быть любой, учитывается перекрытие, сдвиг линий, непрерывный фон и произвольное распределение коэффициента поглощения по радиусу.

В главе 3 приводятся данные о параметрах состояния плазмы разрядных источников излучения, разрабатываются модели сильно неравновесной неизотермичной многокомпонентной плазмы, описываются модели непрерывных и импульсных селективно излучающих разрядов в условиях ЛТР.

Определение радиационных полей в системах с селективно излучающими разрядами требует построения моделей среды, т.е. плазмы. Модель неравновесной излучающей плазмы строится в гидродинамическом приближении, при этом плазма представляется в виде совокупности компонент: электронов, ионов, излучающих атомов и нейтрального газа-буфера. Выделяются три энергетические подсистемы, обмен энергией между которыми определяет развитие процессов в плазме: поступательные степени свободы электронного газа, поступательные степени свободы тяжелых частиц (атомов, ионов) и уровни энергии связанных электронов в излучающих атомах. Модель плазмы строится на основе описания каждой из энергетических подсистем, их взаимодействия друг с другом и внешней средой. Одновременно рассматривается и иная структура плазменной системы в связи с учетом процессов материального переноса в среде с выделением подсистемы заряженных частиц, участвующих в амбиполярной диффузии, и подсистемы диффундирующих нейтральных частиц, находящихся на различных уровнях энергии.

Теоретической основой моделирования процессов в плазме в рамках многожидкостной гидродинамики служат работы Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшица, Я.Б. Зельдовича, Ю.П. Райзера, С.И. Брагинского, М. Митчнера, Ч. Кругера и др. Различные приложения теории содержатся в работах Л.И. Гудзенко, С.И. Яковленко, В.И. Хвезюка, И.П. Назаренко, А.М. Зимина, С.В. Дресвина, И.И. Литвинова, В.С. Энгельшта, В.В. Лелевкина и др. Система гидродинамических уравнений, в которых фигурируют макроскопические параметры плазмы (температуры компонент, скорости их движения, концентрации частиц) может быть получена из кинетических уравнений Больцмана. Хаотическая скорость частиц рассматривается относительно среднемассовой скорости движения плазмы U .

Уравнения непрерывности для частиц одного сорта

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} + \text{div} [n_a (\bar{u} + U_a)] = n_a \quad (3.1)$$

где U_a , n_a — диффузионная скорость компоненты a и скорость изменения концентрации частиц в объеме в результате неупругих столкновений с другими сортами частиц. Уравнения переноса импульса для заряженных и нейтральных компонент формулируются без учета вязкости и термодиффузии, например, для электронного газа

$$m_e n_e \frac{d\bar{u}}{dt} = -en_e E - \nabla p_e - m_e n_e \sum_k v_{ek} (U_e - U_k), \quad (3.2)$$

Здесь m_e , n_e , e , p_e , v_{ek} , E — соответственно, масса, объемная концентрация, заряд, давление, частота упругих столкновений электронов, напряженность электрического поля. Суммирование в правой части выполняется по всем сортам частиц, с которыми взаимодействуют электроны. Из уравнений типа (3.2) выводится уравнение для радиального потока амбиполярной диффузии заряженных частиц к непроводящим стенкам оболочки.

Для электронного газа уравнение энергии с учетом неупругих потерь, связанных с возбуждением тяжелых частиц и излучением имеет вид

$$\frac{d}{dt} (n_e \frac{3}{2} kT_e) + n_e \frac{5}{2} kT_e \text{div} \bar{u} = -\text{div} q_e + \sigma E^2 - n_e \sum_k 3k(T_e - T_h) \frac{m_e}{m_k} v_{ek} - W - R,$$

$$\text{где } q_e = F_e + \frac{5}{2} kT_e n_e U_e, \quad F_e = -\lambda_e \nabla T_e, \quad R = \text{div} F_R,$$

$T_e, T_h, W, F_R, k, \sigma, \lambda_e$ — температуры электронов и тяжелых компонент, скорость накопления энергии тяжелыми частицами, возбуждаемыми в ходе неупругих столкновений, плотность интегрального по спектру потока излучения, константа Больцмана, коэффициенты электропроводности и электронной теплопроводности. Суммирование в правой части проводится по всем сортам тяжелых частиц.

Для определения величины W необходимо рассматривать кинетику заселения уровней, т.к. эта величина выражается через скорости заселения уровней, фигурирующие в правой части (3.1). Сюда же включаются затраты энергии на ионизацию и нагрев образовавшихся электронов до средней тепловой энергии. Для вычисления скоростей образования или гибели частиц в (3.1) необходимо выбрать и обосновать модель кинетики заселения возбужденных уровней энергии излучающей компоненты. Данный вопрос в силу его важности для кинетики неравновесной плазмы исследовался многими авторами. Среди обзорных публикаций и книг следует отметить работы Я.Б. Зельдовича, Ю.П. Райзера, D.R. Bates, A.E. Kingston, R.W.P. McWhirter, A. Далгарно, Л.М. Бибермана, В.С. Воробьева, И.Т. Якубова, Б.М. Смирнова, Л.П. Питаевского, А.В. Гуревича и др. При этом наиболее разработана модель ударно-излучательной ионизации и рекомбинации. В одних работах

проводится прямое численное решение системы уравнений кинетики, в других движение электронов по связанным состояниям рассматривается как диффузия в пространстве энергий. В задачах моделирования излучения в отдельных спектральных линиях, которая решается в настоящей работе, нужна весьма детальная информация о заселенностях участвующих в излучении уровней и других уровней, влияющих на этот процесс. Поэтому в диссертации, выбрана модель кинетики, основанная на схеме индивидуально учитываемых уровней. При этом небольшая область связанных состояний, примыкающая к непрерывному спектру, объединяется в блок со свободными электронами.

При расчете скоростей процессов возбуждения и ионизации в результате электронных соударений необходимо вычислять интеграл свертки сечений неупругих процессов и функции распределения электронов по энергиям $\mathcal{E}$. Высокоэнергетичный «хвост» этой функции заметно отличается от равновесного и для замыкания модели требуется использовать уравнение Больцмана. Согласно М. Митчнеру и Ч. Кругеру для нахождения изотропной части функции распределения электронов можно применить уравнение

$$\mathcal{E} \frac{d}{d\mathcal{E}} \left[\mathcal{E} a(\mathcal{E}) \frac{d f^0}{d\mathcal{E}} (\mathcal{E}) + b(\mathcal{E}) f^0 (\mathcal{E}) \right] = \phi (f^0 (\mathcal{E}), f^0 (\mathcal{E} - \mathcal{E}_{01})), \text{ где коэффициенты}$$

$a(\mathcal{E}), b(\mathcal{E}), c(\mathcal{E})$ выражаются через интегралы от функции распределения, энергию электронов $\mathcal{E}$, сечение возбуждения резонансного уровня и т.д., функция $\phi (f^0 (\mathcal{E}))$ является комбинацией функций распределения с аргументами $\mathcal{E}, \mathcal{E} - \mathcal{E}_{01}$, индексы 0,1 нумеруют основной и резонансный уровень энергии атома.

Рис. 3.1 иллюстрирует значительно более быстрый спад функции распределения электронов на «хвосте» по сравнению с максвелловским распределением в разрядах низкого давления в парах Hg с Ag.

Полученная математическая модель используется для расчетов разрядов низкого давления (давление излучающей компоненты- Hg - составляет 0.1-10 Па). Все фигурирующие в расчетах материальные функции рассчитываются в ходе решения задачи. Предварительная табуляция величин практически невозможна.

Для разрядов более высокого давления (порядка 0.01-0.1 МПа для Хе, Kr, Hg) модель упрощается за счет того, что распределение частиц по уровням энергии вплоть до резонансного уровня можно принять соответствующим закону Больцмана с температурой электронов. Тогда достаточно выделить четыре сорта частиц: электроны, ионы, атомы в возбужденных состояниях и атомы в основном состоянии и включить в расчет амбиполярную диффузию и диффузию двух сортов нейтралов. Дальнейшее упрощение модели связано с принятием больцмановского распределения частиц с темпера-

турой электронов по всем уровням, вплоть до основного. В этом случае можно предварительно затабулировать коэффициент оптического поглощения, отнесенный к одной излучающей частице, в функции электронной температуры и концентрации электронов. В приближении ЛТР система урав-

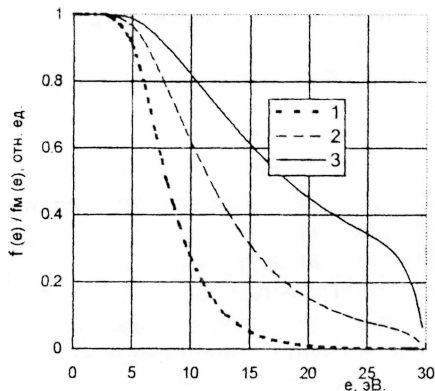


Рис. 3.1 Отношение истинной функции распределения электронов по энергиям к максвелловской на оси разрядной трубки радиуса $R=9.5$ мм
Давления Hg и Ag 0.85 и 465 Па, соответственно. 1- ток $I=0.6$ А, 2 – 0.4 А, 3 – 0.2 А

нений модели включает уравнения энергии, переноса излучения, непрерывности для плазмы, закона Ома, внешней электрической цепи и соотношений для определения рабочего давления плазмы в замкнутом объеме. Все материальные функции используются в виде заранее подготовленных таблиц.

Вопросы информационного обеспечения численных экспериментов рассматриваются в главе 4.

Вычислительный эксперимент требует весьма полной и надежной базы данных по широкому кругу характеристик элементов систем и используемых материалов. База неизбежно состоит из множества подсистем, среди которых центральное место занимает подсистема, обслуживающая расчеты физических явлений в плазме. При ее построении последовательно проводится принцип, согласно которому пополнение базы может производиться путем отбора данных из любых источников, но все основные характеристики плазмы должны быть обеспечены хорошо апробированными методами и средствами расчета. Одна из причин такого подхода заключается в том, что для неравновесной плазмы большинство ее свойств необходимо рассчитывать в самом процессе моделирования (тот же коэффициент поглощения, коэффициенты электро- и теплопроводности, скорости неупругих процессов и т.д.).

Электронные коэффициенты переноса (электропроводности и электронной теплопроводности) вычисляются по методу Фроста (на рис.4.1 приведены в качестве примера данные по электропроводности в сравнении с результатами других авторов). Составляющие коэффициента теплопроводности, свя-

занные с тяжелыми компонентами, рассчитываются по методу Гиршфельдера.

Наиболее трудоемкой частью работы по созданию базы данных является получение массивов коэффициента оптического поглощения. Основными радиационными процессами, определяющими оптические свойства многокомпонентной атомарной плазмы, являются: фотоионизация атомов и ионов (bf - переходы), торможение электронов в полях ионов и нейтральных частиц (ff - переходы), дискретные переходы связанных электронов (bb). При расчетах наиболее существенной фотоионизационной составляющей коэффициента поглощения применяется процедура непосредственного суммирования по уровням энергии, с которых возможен отрыв электрона на данной частоте. Сечения фотоионизации вычисляются методом Берджесса-Ситона. Для нижних уровней энергии (малых длин волн) в ряде случаев приходится отдавать предпочтение сечениям, рассчитанным по более точным методам или полученным экспериментально. Вклад фотоионизации группы верхних водородоподобных уровней определяется по интегральным формулам Бибермана-Нормана. Свободно - свободные переходы электронов в полях ионов учитываются по Крамерсу с введением фактора Гаунта. Принимается во внимание также поглощение, связанное с обратным тормозным эффектом в полях нейтральных частиц.

Линейчатый спектр формируется в результате перекрытия крыльев линий, уширенных различными механизмами - штарковским, резонансным, доплеровским, вандерваальсовским. Перенос излучения в линиях в связи с их узостью и большим количеством сильно осложняет решение задач лучистого теплообмена. Существует целый ряд методов построения соответствующих спектральных моделей. В настоящей работе вся совокупность спектральных линий каждого компонента разбивается на две группы. Линии, у которых нижний уровень является основным, а также наиболее интенсивные линии учитываются индивидуально. Остальные дискретные переходы учитываются интегрально. Их включение в расчетную схему осуществляется либо усреднением интегрального коэффициента линии по некоторому интервалу спектра, либо в приближении объемного высвечивания.

При расчете коэффициента поглощения в группе индивидуально учитываемых линий принимаются во внимание ударный и доплеровский механизмы уширения, т.е. профиль линии принимается фойхтовским. При заметных концентрациях электронов определяющим механизмом уширения оказывается квадратичное штарковское уширение. Ударные ширины линии и их сдвиги вычисляются в рамках неадиабатических теорий, развитых в работах Г. Грима, И.И. Собельмана и др. Сила линии, которая входит во многие формулы при расчетах оптических свойств линий, рассчитывается в одноконфигурационном приближении, при этом приведенная сила линии определяется по методике Рака, а сила одноэлектронного мультиплета вычисляется в кулоновском приближении. При массовом счете оптических свойств примене-

ние указанного способа расчета сил линий является практически единственно возможным. Для ряда линий, обычно резонансных, вероятности спонтанных переходов заимствуются из разных источников, содержащих более точные данные.

В качестве примера на рис. 4.2 приведены расчетные данные по суммарному коэффициенту поглощения ксеноновой плазмы. С такой степенью детализации коэффициент поглощения k_ν хранится в базе данных. Отметим, что все методы и реализующие их программы подвергались тщательной проверке на основе сравнения с опубликованными расчетными и экспериментальными данными, например, в части расчета оптических свойств - по штарковским константам C_4 , сдвигам уровней энергии атомов в электрических полях δ , вероятностям переходов A_{ik} , ударным штарковским ширинам линий, коэффициентам поглощения. Некоторые результаты такого сопоставления для Xe, представлены на рис. 4.2 и в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнение оптических величин, полученных в настоящей и других работах

Уровень, переход	$C_4 \cdot 10^{14}$, см ⁴ /с	$C_4 \cdot 10^{14}$, см ⁴ /с	δ , см-1	δ , см-1
7 s [3/2] ₂ ⁰	1.62	—	0.261	0.29 *
7 p [5/2] ₃	14.80	11.17 **	2.38	1.79 **
6 s [3/2] ₂ ⁰ - 7 p [3/2] ₂	24.10	20.1 ***	—	—
6 s [3/2] ₂ ⁰ - 7 p [5/2] ₃	14.70	14.7 ***	—	—

Примечание: в таблице представлены данные Горчакова Л.В. и др. - *, Spiegelhalter F. - **, Lesage A. и др. - ***.

В главе 5 рассматриваются методы и алгоритмы решения уравнений моделей. Обсуждаются состав программного комплекса и решаемые с его помощью задачи.

Расчет распределения дивергенции лучистого потока по радиусу плазменного объема цилиндрической конфигурации производится двумя методами: непосредственным интегрированием по пространству точного уравнения переноса излучения и в диффузионном приближении. Алгоритм, разработанный в первом методе, применяется для исследования точности диффузионного приближения и уменьшения даваемой им погрешности за счет корректировки граничных условий, в частности, путем перехода от решения краевой задачи к задаче Коши или точного вычисления спектрального потока на границе плазмы.

Модель плазмы с неравновесностью различных типов включает в общем случае уравнения энергии для легкой и тяжелой компонент, уравнения

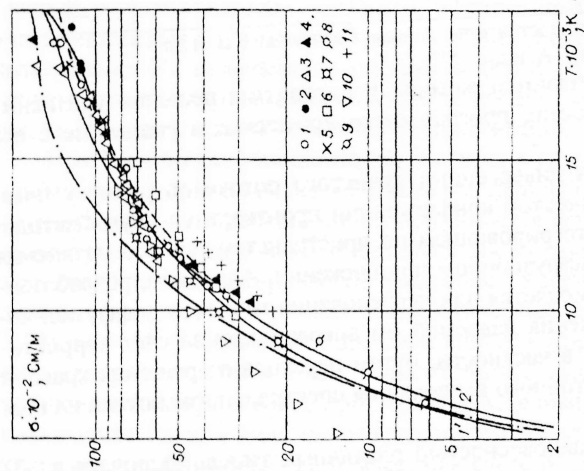


Рис. 4.1. Зависимость электропроводности ксеноновой плазмы от температуры

1' - $p=0.5$; 2' - 2.5 МПа - настоящая работа. (---) - $n_2 = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, данные Калиткина Н.Н. и др., штрих-пунктир - $p=1$ МПа, Девото Ф.С., 9 - $p=2.5$ МПа, Schirmer Н. Экспериментальные результаты: 1, 2, 3, 5, 8 - данные Андреева С.И. и др., 6 - Бакеева А.А. и др., 7 - Church С.Н. и др., 11 - Вукович С.М. и др., 4 - Gunter К и др., 10 - Moden J.C. 2 - $p_0 = 0.007$; 8 - 0.013 ; 7 - 0.02 ; 1, 10 - 0.027 ; 3, 4, 6, 11 - 0.053 ; 5 - 0.078 МПа

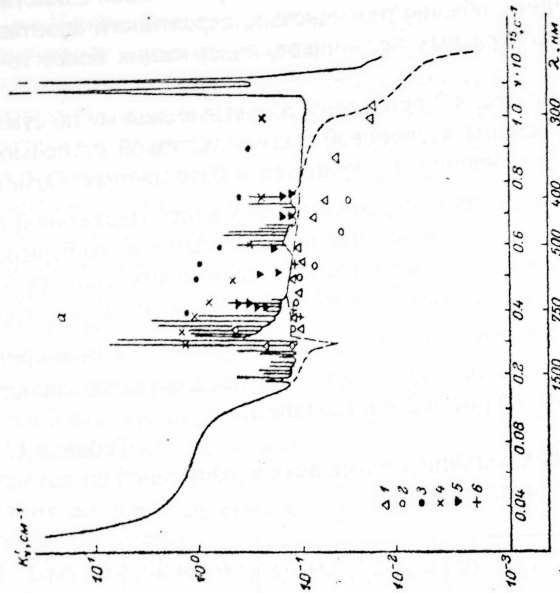


Рис. 4.2. Теоретические и экспериментальные данные по коэффициенту поглощения ксеноновой плазмы

Температура плазмы $T=10^4 \text{ K}$. Экспериментальные данные: 1 - Eppmet J.L. и др., 2 - Бакеев А.А. и др., 3, 4 - Дойников А.С. и др., 5 - Гембаржевский Г.В. и др. (нанесены точки, пересчитанные на давление $p=1.5$ МПа и $T=10^4 \text{ K}$). 1, 3, 4 - $p_0 = 0.04$ МПа, 2 - $p=1.5$ МПа. Теоретические результаты: $p=1.5$ МПа, сплошная кривая - настоящая работа; штриховая - по данным Щербакова А.А. (сплошной спектр); 6 - данные Киселевского Л.И. и др. ($p=1.5$ МПа)

переноса излучения, уравнения диффузии заряженных частиц и частиц, находящихся на разных энергетических уровнях, уравнение непрерывности для плазмы в целом, формулы и алгоритмы для расчета оптических, транспортных свойств плазмы и скоростей упругих и неупругих процессов, уравнение Больцмана для функции распределения электронов, а также ряд соотношений для определения давления плазмы с учетом развития процессов в замкнутом объеме. Модели плазмы в состоянии ЛТР заметно упрощаются, хотя остаются отмеченные трудности учета переноса селективного излучения.

Для решения систем уравнений моделей применяются комбинации различных методов, теоретические основы которых заложены в работах А.А. Самарского с сотрудниками, Н.С. Бахвалова, И.С. Березина, Н.П. Жидкова, Г.И. Марчука, Н.Н. Калиткина и др. Уравнения в частных производных аппроксимируются конечно-разностными аналогами на шести- и четырехточечном шаблонах с использованием интегро - интерполяционного метода, позволяющего получать двухслойные консервативные однородные неявные разностные схемы. Граничные условия аппроксимируются на граничном двухточечном шаблоне со вторым порядком аппроксимации.

Аппроксимация дифференциальных уравнений второго порядка и в частных производных проводится на трех видах сеток: равномерных, квазиравномерных и сетках с фиктивными узлами.

Помимо указанных разностных схем в ряде случаев применяются схемы специального вида. Потребность в них возникает, например, при реализации диффузионного приближения в случае больших оптических плотностей плазмы ($\tau = \bar{\kappa} R > 100$, где $\bar{\kappa}$ - средний по радиусу коэффициент поглощения). При этом область интегрирования разбивается на ряд цилиндрических слоев с постоянными коэффициентами поглощения и излучения среды. Разностная схема строится путем сшивки в узлах аналитических решений для слоев.

Алгоритм реализации систем разностных уравнений основан на последовательных прогонках. В случае решения систем дифференциальных уравнений большого порядка выделяются по физическим процессам группы уравнений (например, уравнений диффузии возбужденных частиц), разностные аппроксимации которых образуют общую систему алгебраических уравнений, которая решается прямым методом Гаусса, методом Гаусса с итерациями, методом Зейделя и его модификациями. Нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих электрическую цепь, проявляет свойства жесткости (на этапе нарастания тока, когда сопротивление плазмы велико). Для ее интегрирования привлекаются А-устойчивые методы второго порядка точности (типа Гира). Комплекс программ строится с учетом решения задач поискового, исследовательского и серийного характера. Каждый вид задач имеет свою технологию и средства реализации, схемы которых обсуждаются в главе. В состав программного комплекса входят три библиотеки программных единиц, база данных и архив результатов моделирования.

Рассмотрены вопросы, связанные с программной реализацией алгоритмов и их проверкой. Для этих целей используются аналитические решения, сопоставление данных, полученных разными методами и по разным моделям, качественный анализ результатов моделирования, сравнение с надежно установленными экспериментальными фактами.

Глава 6 содержит результаты исследования энергетических процессов в лазерных излучателях на неодимовых активных средах. Приводится обширный материал по процессам в плазме ламп накачки и в активных средах, обсуждается проблема наиболее эффективного использования излучения и повышения КПД накачки и генерации, дается анализ точности моделей.

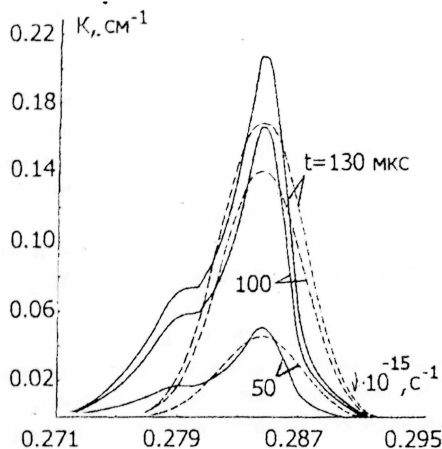


Рис. 6.1. Спектральное распределение коэффициента усиления. Сплошные кривые — с учетом штарковского расщепления, пунктирные — без учета. Цифры у кривых — время от начала импульса тока через лампу, мкс. Параметры лампы: $R=0.15$ см, $p_0=0.0395$ МПа, $\langle T \rangle = 14000$ К. Параметры разрядного контура: индуктивность — 30 мкГн, емкость — 100 мкФ, сопротивление контура — 0.1 Ом, начальное напряжение на конденсаторе 790 В, длительность импульса — 180 мкс. Полостной активный элемент с внутренним и внешним диаметрами 0.55 и 0.85 см.

Процессы в неодимовом стекле исследуются на основе математической модели энергетических процессов в лазерах со спектрально-неоднородной активной средой в режимах запасаения энергии на верхнем лазерном уровне и генерации моноимпульса. Учет неоднородного уширения полосы люминесценции позволяет получить ряд новых эффектов, отсутствующих в модели однородного уширения линии: деформацию контура полосы люминесценции, «выжигание» провалов в спектре люминесценции, затягивание провалов за счет миграции энергии возбуждения и другие. В случае ионов неодима ситуация осложняется из-за штарковского расщепления уровней, в результате чего полоса люминесценции включает 12 штарковских неоднородно уширенных сильно перекрывающихся компонент, т.е. имеет сложную структуру, вызывающую затруднения в интерпретации экспериментальных данных и при решении задач о спектральных особенностях запасаения и съема энергии в активной среде.

На рис. 6.1 в качестве примера сопоставлены результаты расчетов коэффициента усиления в режиме запасаения энергии в активном теле полостного

типа из фосфатного неодимового стекла, проведенных с использованием разных моделей. Видно, что учет штарковской структуры уровней заметно изменяет спектральное распределение коэффициента усиления, линия становится асимметричной, более соответствующей эксперименту. В центре полосы усиления отличие в расчетах по данной и более простым моделям, не учитывающим отмеченные особенности активной среды, достигает 20%, в крыльях линии различие весьма существенно.

Для проверки теории был поставлен эксперимент на лазерах со специально изготовленными полостными активными элементами из стекла ГЛС-23 двух размеров с отличием объемов примерно в 10 раз. Сравнение продемонстрировало совпадение теории с экспериментом по КПД запасаемой энергии на верхнем лазерном уровне в пределах 8-12 %. При этом на большем активном элементе (АЭ) получен КПД - около 7.5 %, а на малом АЭ показано, что можно реализовать еще больший КПД - около 9.3 % в подтверждение предложенным в данной главе принципам разработки высокоэффективных лазерных систем.

Достоверность результатов моделирования систем во многом зависит от качества моделей источников излучения. В этой связи проведено исследование спектральных и теплофизических характеристик разрядов с инертной плазмообразующей средой (Xe, Kr). Выполнен анализ результатов и сопоставление с экспериментальными данными по температурным полям в плазме, вольт-амперным динамическим и статическим характеристикам, спектральному распределению излучения, интегральному по спектру КПД излучения, энергетическим потерям на стабилизирующей разряд оболочке (рис. 6.2). Погрешность моделирования оценена на уровне 7-15%. Рис. 6.3 демонстрирует уровень детализации спектра в процессе моделирования характеристик плазмы. Обработанные данные эксперимента находятся в согласии с теоретической кривой.

На основе комплексного моделирования процессов в системах накачки проведено исследование вопроса о способах наиболее эффективной передачи энергии от источника излучения к активной среде. Обсуждаются влияние различных параметров на запасаение энергии на верхнем лазерном уровне, развитие суперлюминесценции и усиление шумов, создаваемых источником накачки на длине волны генерации. В рамках концепции «светового котла», в разработку которой большой вклад внесли Мак А.А., Щербаков А.А. и др., рассмотрены принципы построения систем накачки повышенной эффективности. Показано, что положительный, на первый взгляд, эффект возврата излучения в плазму, не приводящий к потерям энергии, на самом деле таковым является не всегда, и безусловно полезен только для тех диапазонов спектра, в которых не происходит накачка активной среды. Поглощение же плазмой собственного отраженного излучения в спектральной области накачки, может при определенных коэффициентах возврата Ψ только ухудшить КПД, при этом, чем больше Ψ , тем быстрее падает КПД системы. Анализ особен-

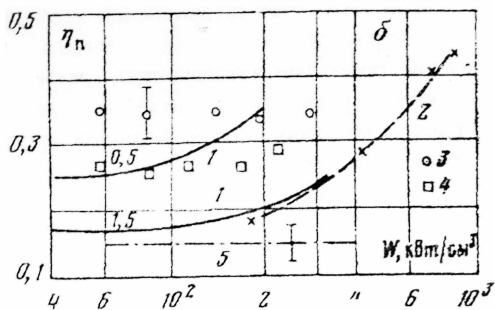


Рис. 6.2. Зависимость энергетических потерь на оболочке от удельной электрической мощности

Теория: 1 — расчет без учета испарения кварца, цифры у кривых (0,5; 1,5) — рабочее давление в МПа; 2 — испарение кварца учтено. Эксперимент: 3 — Розанов А.Г. и др.; 4 — Балагуров А.Я. и др.; 5 — Бакев А.А. и др.

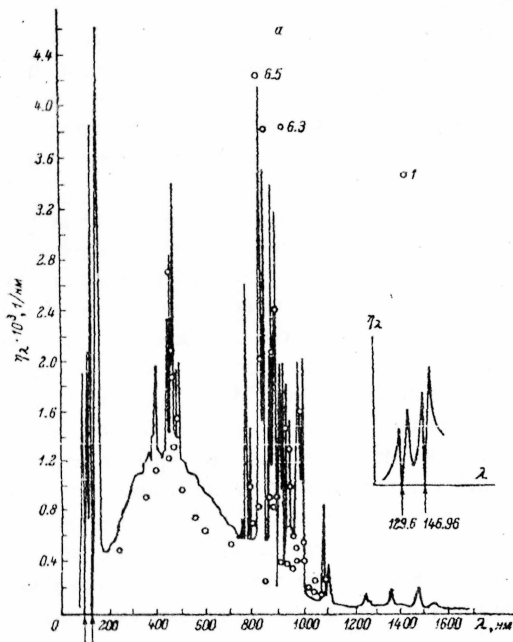


Рис. 6.3. Спектральное распределение относительной интенсивности излучения ксеноновой плазмы

$R=0.35\text{ см}$; температура на оси $T_0 = 10^4\text{ К}$, удельная электрическая мощность 27 кВт/см^2 ;

1- экспериментальные значения Дойникова А.С. и др.

ностей работы замкнутых систем позволяет выявить условия, выполнение которых дает возможность с большей полнотой реализовать потенциал ламп накачки и повысить эффективность работы систем. Прежде всего, конфигурация системы должна обеспечивать обязательную передачу излучения разряда в рабочей области спектра на приемник до того, как оно возвратится в разряд, т.е. необходимо устранять непосредственную обратную связь плазма – элементы системы, из которой исключена активная среда. Излучение накачки должно хотя бы один раз пройти через приемник прежде, чем оно вернется в разряд. Далее, необходимо организовать многопроходовой режим распространения излучения в приемнике, чтобы увеличить общую длину лучей в среде. Применительно к неодимовым средам выполнение данного требования позволяет включить в процесс поглощения слабые полосы накачки и крылья линий поглощения. Наконец, надо максимально возвращать излучение в непроизводительной области в разряд.

Выполнение указанных условий заставляет проводить вполне определенное конфигурирование систем накачки для повышения их КПД. Наилучшими показателями по КПД накачки обладает система с полостным активным элементом и лампой накачки в полости. На внешнюю поверхность элемента наносится диффузно отражающее покрытие. На такой системе, изготовленной под руководством Мака А.А. по результатам моделирования, в режиме свободной генерации на фосфатном стекле был получен рекордный КПД около 9% по вкладываемой в разряд электрической мощности. Родственная указанной конфигурации система с размещением активной среды вокруг лампы представлена на рис. 2.1. Для нее характерно разнесение активной среды по отдельным элементам, так что каждый активный элемент оказывается как бы в своей камере накачки. При этом осуществляется оптическая развязка АЭ и подавление эффектов суперлюминесценции. В экспериментах с лазерами такой конструкции на АИГ:Nd были получены весьма высокие характеристики по КПД запасаения энергии и генерации моноимпульса (на уровне около 5 и 2.3%, соответственно, что почти в 2 раза выше значений, характерных для традиционных конфигураций квантронов с одной лампой и одним АЭ, размещаемых в круговым моноблоке).

В работе выполнен большой цикл исследований влияния систем на параметры ламп и многочисленных факторов на эффективность накачки: мощности накачки, характера отражателя, коэффициента отражения, поглощательных свойств материалов элементов и многих других. Одни параметры влияют на КПД сильно, другие менее заметно. Интересно отметить, что незначительные на первый взгляд ухудшения оптических свойств элементов системы и условий фильтрации приводят в комплексе к снижению КПД почти в 5 раз, т.е. установлен количественно уровень сбалансированности требований к качеству элементов для достижения предельной эффективности систем.

Длительное время прогресс в повышении эффективности источников излучения связывался с применением интерференционных светофильтров, наносимых на поверхность оболочек, отражающих в плазму излучение в нужных областях спектра. Численные эксперименты показали, что оптимизм в этом прогнозе для систем накачки неоправдан, т.к. сама система играет роль активного светофильтра. Для других технических приложений покрытий при определенных условиях могут оказаться эффективными.

Важным фактором, влияющим на энергетическую эффективность систем накачки и долговечность ламп накачки, являются потери энергии на оболочке источников излучения (рис. 6.2, ксеноновый разряд). В работе изучены основные механизмы потерь, включая кондуктивные потоки, поглощение излучения, особенно в УФ-области за коротковолновой границей пропускания материала оболочек, вынос энергии диффузионным потоком частиц, и дан их анализ в сравнении с экспериментальными данными. Для практики большое значение имеет такая характеристика, как предельная энергия ламп накачки W_{np} , которая зависит от потерь энергии на оболочке. Разработанные методы расчета W_{np} вполне удовлетворительно отражают имеющиеся данные экспериментов.

В главе 7 представлены результаты моделирования процессов в системах и лампах различного светотехнического назначения, применяемых для генерации узкополосного ИК- и видимого излучения, рассмотрена проблема управления спектром ламп с помощью интерференционных покрытий, проведено исследование разрядов низкого давления, используемых в установках УФ-излучения.

Лампы на парах щелочных металлов составляют важный класс источников селективного излучения, которые находят применение для целей освещения, сигнализации, научных исследований и др. В качестве плазмобразующей среды в той или иной степени используются практически все металлы указанной группы: натрий, калий, рубидий, цезий и их смеси друг с другом и с парами ртути и инертными газами. Накопленные данные по параметрам указанных разрядов представляют неоценимый материал для апробации и детальной отработки математических моделей плазмы и их информационного оснащения. В работе исследован широкий диапазон параметров разрядов. Все внутренние и выходные характеристики ламп оценены в сравнении с экспериментом. Сделаны выводы о применимости тех или иных моделей для решения конкретных задач. Сравнение спектров излучения температурных полей в плазме, электрических и энергетических характеристик свидетельствуют об удовлетворительной точности моделирования (рис. 7.1).

Отдельное исследование посвящено вопросам оптимизации цезиевых источников ИК-излучения, используемых в различном бортовом оборудовании для генерации световых импульсов с заданными мощностью и глубиной

модуляции. Материалы рекламного характера по данным излучателям широко представлены в информационных изданиях зарубежных фирм, однако публикации по физике процессов в плазме, спектральным, энергетическим и теплофизическим характеристикам таких источников излучения крайне скудны. В модели учтено излучение системы стабилизирующих разряд оболочек, маскирующее модуляционные характеристики излучения разряда.

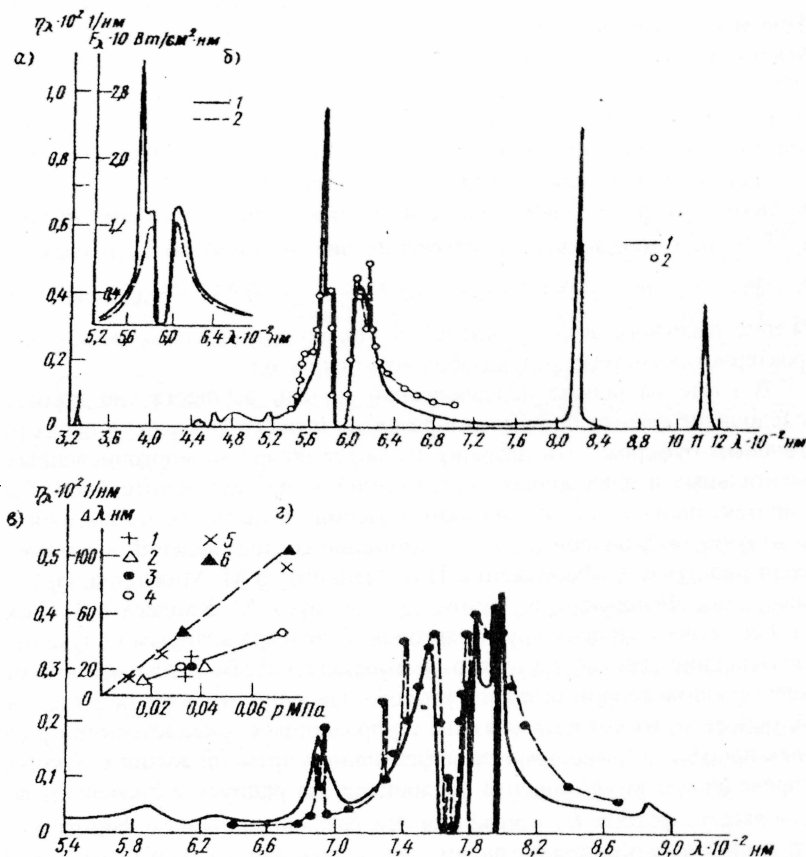


Рис. 7.1. Излучательные характеристики разрядов в парах металлов
1,5 — данные настоящей работы; а — Na; 2 — De Groot J.J. и др.; б — Na; $I = 4.5 \text{ A}$; $R = 0.35 \text{ см}$; 2 — Lowke J.J.; в — K - Rb - Xe; 2 — Ананьев А.Ю. и др.; г — 1 - 4 — Na; 5, 6 — K; 2 — De Groot J.J. и др.; 3 — Waszink J.H.; 4, 6 — Schmidt K.

Выполнено исследование влияния геометрических, энергетических и физи-

ческих параметров излучателей на спектральные распределения пиковой интенсивности и глубины модуляции излучения, сформулированы важнейшие направления совершенствования источников излучения данного типа.

Актуальная проблема управления спектральным составом генерируемого излучения рассматривается на примере высокоэффективных ламп с интерференционными покрытиями-светофильтрами, наносимыми на оболочку. Излучение, отражаемое светофильтрами в разряд, подогревает плазму, в результате чего происходит трансформация излучения из одной спектральной области в другую с повышением КПД излучения в заданных спектральных областях и его фильтрацией вне рабочего диапазона. Полученные данные позволяют оценить перспективы применения покрытий для различных приложений, в частности, для повышения световой отдачи ксеноновых ламп. Показано, что при больших диаметрах (порядка 0.02 м) и стандартном давлении наполнения в диапазоне электрических мощностей $P=100-250$ Вт/см покрытия дают повышение эффективности по сравнению с лампами без покрытий на 15 % при коэффициенте отражения вне видимой области спектра $\rho_\lambda = 0.85$; 25-35 % - при $\rho_\lambda = 0.95$ и 35 - 45 % при $\rho_\lambda = 0.98$. Установлено, что достижение заметного эффекта возможно только при тщательном согласовании характеристик системы разряд-оболочка-покрытие.

В главе на основе неравновесной модели осуществлено комплексное исследование физики процессов в разрядах низкого давления в парах ртути с аргоновым буфером. Эти разряды являются объектом многочисленных фундаментальных и прикладных исследований в силу исключительного богатства протекающих в них физических явлений, а также очень высокого КПД УФ-излучения. Большой вклад в понимание физики явлений в плазме ртути внесли работы В.А. Фабриканта, Н.П. Пенкина, В.М. Миленина, Н.А. Тимофеева, А.С. Федоренко, К. Кенти, Д. Уэймауса, М. Кайлеса, Г.Н. Рохлина, С.П. Решенова и многих других авторов, благодаря которым получены основополагающие данные по макро- и микропроцессам в плазменном столбе. Существующие теории разрядов низкого давления строятся на ряде допущений, основные из которых связаны с упрощенным рассмотрением радиационных процессов (приближение эффективного времени жизни с однородным распределением коэффициента поглощения по радиусу и значением вероятности вылета фотона θ , взятой для оси разряда), заданием формы радиального распределения концентрации электронов или вообще усреднением параметров разряда по радиусу (концентраций частиц, температур электронов и тяжелых частиц), упрощением схемы переходов между уровнями атомов, пренебрежением рекомбинацией заряженных частиц в объеме, введением различных аппроксимаций для сечений упругих и неупругих столкновений компонент и др. В работе выполнено детальное исследование параметров плазмы: температурных распределений электронов, атомов и ионов, составляющих энергетического баланса разряда, концентраций частиц на различ-

ных уровнях, в том числе метастабильном и резонансных. Получены спек-

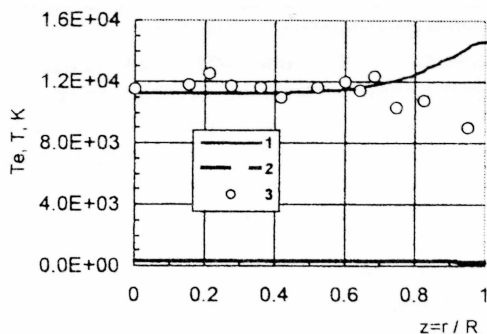


Рис.7.2. Распределение температур электронов (1,3) и тяжелых частиц (2) в разряде 1,2-настоящая работа, $R=19$ мм $I=0.42$ А, давления Hg и Ar 0.85 и 465 Па; 3-данные эксперимента (Д.Уэймаус), $R=18$ мм, $I=0.4$ А, давления Hg и Ar 0.85 и 390 Па.

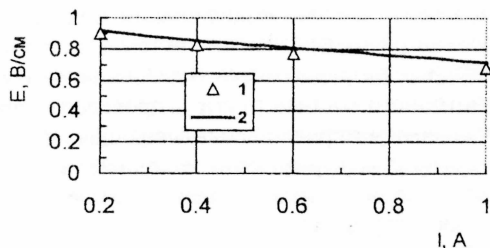


Рис.7.3. Вольт-амперные характеристики разряда ления. Давление Hg 0.85 Па, $R=19$ мм. 1-данные эксперимента (Г.Н. Рохлин), давление Ar 530 Па, 2-результаты настоящей работы, давление Ar 465 Па.

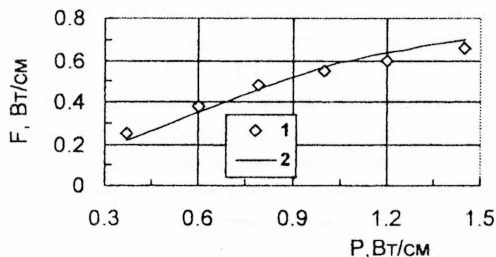


Рис.7.4. Зависимость потока излучения в линии 253.7 нм от электрической мощности Давление Hg 0.85 Па. 1-данные эксперимента (Д. Уэймаус), $R=18$ мм, давление Ar 390 Па; 2- результаты настоящей работы, $R=19$ мм, давление Ar 465 Па.

тральные распределения излучения в двух УФ- линиях с учетом изотопного состава ртути. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик (рис. 7.2-7.4) позволяет оценить погрешность модели на уровне не хуже 10%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Синтезирована обобщенная концептуальная модель и разработаны соответствующие методы расчета процессов распространения излучения в многоэлементных устройствах различного светооптического назначения с объемными источниками лучистой энергии с учетом реальной конфигу-

рации и реальных оптических свойств материалов и поверхностей разнородных элементов, поглощающих, отражающих, усиливающих и рассеивающих излучение сложного спектрального состава в канале радиационного взаимодействия излучателей с приемником.

2. Построена система информационного оснащения численных экспериментов, на основе которой проведены систематические исследования теплофизических и оптических свойств ряда важных для практики плазмобразующих сред. Исследован вклад основных радиационных процессов в формирование суммарного коэффициента оптического поглощения и излучения разрядов в различных режимах работы, изучена роль процессов, ответственных за уширение спектральных линий в плазме ламп, показано влияние немаксвелловости функции распределения электронов по энергиям на скорости процессов возбуждения и ионизации частиц.
3. Разработана вычислительная модель для описания пространственно неоднородной сильноизлучающей многокомпонентной разрядной плазмы в условиях, когда все основные функции распределения существенно неравновесны. Рассмотрены практически важные модификации модели, отражающие широкий спектр условий работы реальных систем. Исследованы процессы в сильно неравновесных разрядах низкого давления на ртути - аргоновой основе с учетом изотопного состава ртути и проведена апробация модели на экспериментальном материале, показывающая, что по основным характеристикам согласие с экспериментом находится в пределах 7-10 %. Созданы предпосылки для оптимизации энергетики установок на основе разрядов с неравновесностью разного типа.
4. Выполнено исследование особенностей функционирования замкнутых систем с объемными излучателями. На основе анализа многостадийного процесса преобразования энергии и различных каналов потерь энергии сформулированы условия и принципы конфигурирования систем накачки лазеров, позволяющие существенно поднять КПД приборов. Расчетные данные по параметрам предложенных высокоэффективных лазерных излучателей специальных конструкций на стеклах и гранатах с Nd подтверждены соответствующими прямыми экспериментами в режимах свободной генерации, запасаения и съема энергии, в ходе которых реализованы КПД, превышающие почти в 2 раза уровень, характерный для традиционных систем накачки. Установлено, что относительно малое (в пределах допусков) ухудшение качества оптических свойств отдельных элементов лазерных систем, находящихся в канале многопроходовости, суммируясь, приводит к снижению КПД накачки в несколько раз.
5. Проведен анализ влияния систем с различными уровнями энергетических потерь на излучательные, тепло- и электрофизические характеристики разрядов. Показано, что при большой оптической плотности плазмы в условиях возврата значительной доли излучения в разряд имеет место заметная трансформация температурных профилей и радиальных распре-

лений других параметров, спектров и потерь энергии на оболочке. Зафиксирована важная функция плазмы разряда в составе системы как нелинейного преобразователя излучения из одной спектральной области в другую, благодаря которой плазма утилизирует непроеизводительные компоненты спектра с одновременным перераспределением лучистых потоков в рабочую спектральную область с соответствующим ростом КПД излучения.

6. Получен комплекс данных по физическим процессам и эксплуатационным характеристикам источников излучения с наполнениями на основе Хе, Кг, Na, К, Hg, Cs в стационарных и нестационарных режимах, составляющий основу для оптимизации спектральной излучательной эффективности ламп и параметров использующих их устройств. На основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных по широкому кругу параметров оценена погрешность разработанных методов и моделей в пределах 8-15%. В рамках проблемы управления спектром излучения ламп за счет применения интерференционных покрытий установлено, что решающее значение в повышении КПД излучения имеет тщательное согласование оптических характеристик системы разряд-оболочка-покрытие. Показано, что в составе системы эффект от покрытий существенно снижается до уровня порядка 15-20% из-за того, что сама система играет роль активного светофильтра.
7. Создано программное обеспечение, нашедшее применение при выполнении большого числа различных технических проектов, которое может рассматриваться как основа систем автоматизации научных исследований и проектирования изделий квантовой электроники, облучательной техники и других устройств, в которых используется селективное излучение высокой интенсивности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 87 научных изданиях; в их числе: глава в монографии, 39 статей в российских научно-технических центральных и ведомственных журналах, 2 статьи в иностранных журналах, 3 статьи в сборниках научных трудов, 10 препринтов, 9 тезисов докладов на Международных, 13 – на Всесоюзных (СССР) и Российских научно-технических конференциях, семинарах и совещаниях, 8 авторских свидетельств на изобретения, 3 учебных пособия.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Градов В.М., Мак А.А., Щербаков А.А. Расчет оптических характеристик ксеноновой плазмы с учетом влияния продуктов эрозии оболочки // Оптика и спектроскопия. – 1977. –Т.43, №2. – С.207 –217. .

2. Методы расчета систем накачки твердотельных лазеров / В.М. Градов, В.Г. Дорогов, Б.А. Константинов и др. // Обзоры по электронной технике. Электроракумные и газоразрядные приборы. – 1978. - Вып.10 (539). - 68 с.

3. Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет нестационарного дугового ксенонового разряда совместно с ограничивающей его стенкой //ЖТФ. – 1979. –Т.49, № 6. - С.1216-1222.

4. Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет излучательных характеристик дуговых криптоновых и ксеноновых разрядов // Оптика и спектроскопия. – 1979. –Т.47, №4. - С.635 –642.

5. Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет электрофизических характеристик дуговых разрядов в криптоне и ксеноне //ТВТ.–1979.–Т.17, №6- С.1161 –1166.

6. Градов В.М., Петрикевич Б.Б., Щербаков А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование источников высокоинтенсивного излучения, применяемых для моделирования теплового нагружения // ИФЖ.–1980.–Т.38, №3. - С.450–456.

7. К теории мощного нестационарного ксенонового разряда с учетом испарения стабилизирующих его стенок / В.М. Градов, В.В. Иванов, Ю.И. Терентьев и др. // ТВТ. – 1981. –Т.19, №1. - С.28 –35.

8. Градов В.М., Щербаков А.А., Яковлев А.В. Расчет оптических и электрофизических характеристик дуговых разрядов в парах щелочных металлов // ТВТ. – 1983. –Т.21, №5. - С.858 –864.

9. Sinyarev G.B., Gradov V.M. Complex Calculations of High - Pressure Discharge Irradiation Characteristics // Beitrage aus der Plasmaphysik. - 1984. - Bd.24, №5. - S. 499 - 528.

10. Градов В.М., Терентьев Ю.И., Щербаков А.А. Расчет теплофизических свойств многокомпонентной плазмы на основе SiO_2 // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. - 1982. – Вып. 1. - С. 86-95.

11. Расчет предельных энергий импульсных газоразрядных ламп / В.М. Градов, А.М. Зимин, В.А. Преображенский и др. // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. - 1981. –Вып. 2. - С. 134-142.

12. Энергетический баланс разрядов высокого давления в парах щелочных металлов / В.М. Градов, Е.Н. Гайдуков, Л.Г. Сапрыкин и др. // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. - 1983. – Вып. 2. - С. 83-90.

13. Теория термической электродуговой плазмы. Ч.2. Нестационарные процессы и радиационный теплообмен в термической плазме / Под ред. М.Ф. Жукова, А.С. Коротева. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. – 287 с.

14. . Лазер на ГСГГ:Cr, Nd с эффективной накачкой и модуляцией добротности /А.Д. Гондра, В.М. Градов, А.А. Данилов и др. // Квантовая электроника. – 1987. –Т.14, №5. - С.916 –917.

15. АИГ: Nd - лазер с системой накачки типа “световой котел” / А.Д. Гондра, В.М. Градов, В.В. Дыбко и др. // Квантовая электроника. – 1987. – Т.14, №12. - С.2449 –2450.

16. Повышение эффективности лазеров на неодимосодержащих средах /А.Д. Гондра, В.М. Градов, В.В. Дыбко и др. // ЖПС.–1988.–Т.49, №1.-С.15–19.

17. Градов В.М. Математическое моделирование радиационных процессов в системах сложной геометрии с селективно излучающей плазмой // Вестник МГТУ. Естественные науки— 1998. — №1. - С.48–58.

18. Метод самосогласованного расчета систем накачки лазеров. Математическая модель систем накачки с неоднородным полем температур в разряде ламп / В.М. Градов, А.А. Мак, А.А. Щербаков и др.// Оптика и спектроскопия. — 1984. —Т.56, №3. - С.490–496.

19. Метод самосогласованного расчета систем накачки лазеров. Характеристики систем накачки с неоднородным распределением температуры в разряде ламп / В.М. Градов, А.А. Мак, А.А. Щербаков и др.// Оптика и спектроскопия. — 1984. —Т.57, №1. - С.105–109.

20. Машинное моделирование процессов в твердотельных лазерных излучателях и усилителях с ламповой накачкой. Электроразрядные источники накачки. Основные физические свойства плазмы источников накачки /Н.Г. Басов, В.М. Градов, В.И. Жильцов и др.—М., 1984.—50с. (Препринт ФИАН, №95).

21. Машинное моделирование процессов в твердотельных лазерных излучателях и усилителях с ламповой накачкой. Электроразрядные источники накачки. Дуговые разряды / В.М. Градов, А.А. Мак, Г.И. Кромский и др. — М., 1984. — 47с. (Препринт ФИАН, №190).

22. Машинное моделирование процессов в твердотельных лазерных излучателях и усилителях с ламповой накачкой. Электроразрядные источники накачки. Импульсные разряды / В.М. Градов, Б.А. Константинов, А.А. Мак и др. — М., 1984. — 45с. (Препринт ФИАН, №191).

23. Машинное моделирование процессов в твердотельных лазерных излучателях и усилителях с ламповой накачкой. Системы накачки лазеров / В.М. Градов, Г.И. Кромский, А.А. Мак и др.—М., 1984.—72с. (Препринт ФИАН, №105).

24. Энергетические процессы в твердотельных лазерах. Режим свободной генерации. (Численное моделирование) / В.М. Градов, Б.А. Константинов, А.А. Мак и др. — М., 1984. — 64с. (Препринт ФИАН, №56).

25. Энергетические процессы в твердотельных лазерах. (Численное моделирование). Режим запасаения энергии / В.М. Градов, Г.И. Кромский, А.А. Мак и др. — М., 1984. — 58с. (Препринт ФИАН, №140).

26. Энергетические процессы в твердотельных лазерах. Режим запасаения энергии. (Сравнительный анализ) / В.М. Градов, Б.А. Константинов, А.А. Мак и др. — М., 1984. — 29с. (Препринт ФИАН, №104).

27. “Световой котел” и проблема повышения эффективности твердотельных лазеров с оптической накачкой / Н.Г. Басов, В.А. Герасимов, В.М. Градов и др. — М., 1984. — 38с. (Препринт ФИАН, №106).

28. Предельная эффективность лазеров на кристаллах, активированных неодимом / А.Д. Гондра, В.М. Градов, Е.В. Жариков и др. — М., 1986. — 21с. (Препринт ИОФАН, №5).

29. Методы моделирования энергетических и пространственно-временных характеристик твердотельных лазеров / В.М. Градов, Л.С. Орбачевский, Ю.И. Терентьев и др. // Радиоэлектронные и лазерные приборы. – М.: Мир, 1990. – С.65-83. (Труды МГТУ / Под ред. Федорова И.Б.).

30. Градов В.М., Синярев Г.Б. Теплообмен в сильноизлучающих нестационарных дугах, стабилизированных стенками // Генерация потоков электродуговой плазмы. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. – С.171 – 183.

31. Градов В.М., Терентьев Ю.И. Моделирование нестационарных режимов твердотельных лазеров с учетом термооптических искажений // Труды МГТУ. – 1990. – Вып. 542. – С.58-73.

32. Градов В.М., Щербаков А.А., Яковлев А.В. Исследование оптических и электрофизических характеристик ламп накачки с парами щелочных металлов // Электронная техника. Сер. 4 - Электровакуумные и газоразрядные приборы. - 1984. - №1/100. - С. 23-30.

33. Градов В.М., Журавлева Л.Н., Щербаков А.А. Оптические и транспортные свойства плазмы паров кальция // Физика низкотемпературной плазмы: Тезисы докладов 7-й Всесоюзной конференции. - Ташкент, 1987. – Т.2. – С.43 – 44.

34. Градов В.М., Терентьев Ю.И. Селективно излучающие нестационарные разряды в парах различных веществ и инертных газах // Физика низкотемпературной плазмы: Тезисы докладов 8-й Всесоюзной конференции. - Минск, 1991. – Т.2. – С.96 – 98.

35. Градов В.М., Гавриш С.В. Математическое моделирование селективно излучающей неравновесной плазмы в составе сложных оптических систем // Светотехника. – 1997. – №5. - С.25 –27.

36. Градов В.М. Численное моделирование сложного теплообмена в селективно излучающей неравновесной плазме // Вычислительная механика и современные прикладные программные системы: Тезисы докладов 10-й юбилейной международной конференции. - Переславль-Залесский, 1999. – С.106 – 108.

37. Об особенностях применения интерференционных покрытий в лампах накачки при наличии осветителя / В.М. Градов, Г.С. Леонов, Т.М. Прокудина и др. // Оптика лазеров: Тезисы докладов 6-й Всесоюзной конференции. - Ленинград, 1990. – С.213.

38. Gradov V.M., Gavrish S.V. Mathematical Modeling of Selective Emitting Nonequilibrium Plasma in Complex Optical Systems // Light & Engineering. – 1997. - v.5, №3. - P.16-19.

39. Градов В.М. Перенос излучения сложного спектрального состава в неравновесных неоднородных средах // Неравновесные процессы в соплах и струях: Тезисы докладов 3-й Международной конференции. - Истра-Москва, 2000. – С.135-137.

Подписано к печати _____ Заказ № 191 Объем 2 п.л.
Тираж 100 экз. Типография МГТУ , 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5