

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**Каланова Дмитрия Валерьевича**  
**«Радиационные эффекты в неравновесной плазме дуговых и тлеющих**  
**разрядов», представленную на соискание ученой степени кандидата**  
**физико-математических наук по специальности**  
**01.04.08 – физика плазмы.**

Диссертационная работа Каланова Д.В. посвящена расчётным и экспериментальным исследованиям явлений переноса излучения в низкотемпературной плазме. В работе затрагиваются как теоретические вопросы: рассматриваются расчетные модели учёта переноса излучения, так и экспериментальные: развиваются методы регистрации излучения от протяжённых плазменных источников излучения и диагностики параметров плазмы по данному излучению.

В диссертации развиты новые расчётные подходы, позволяющие учитывать явление переноса при исследовании и применении газоразрядной плазмы для различных контуров спектральных линий, в условиях пространственной неоднородности коэффициента поглощения и сложных геометриях источников излучения. Результаты работы вносят вклад в развитие радиационных методов исследования плазмы и проектирования газоразрядных источников излучения.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений.

Во **Введении** обсуждается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, отмечается научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**Первая глава** посвящена обзору литературы по задачам, решаемым во 2-5 главах.

В обзоре литературы к главе 2, посвящённой переносу излучения в неравновесной плазме, рассмотрены различные способы решения уравнения Холстейна-Бибермана: с помощью приближения эффективного времени

жизни, через разложение по модам интегрального оператора, методом с дискредитацией по элементарным объёмам, методом функции пропагатора с использованием пространственно-частотной дискретизации, методами совместного решения уравнения переноса излучения с уравнениями, описывающими баланс компонент плазмы.

В обзоре литературы, посвящённой задаче распространения излучения в сильноточной дуге, рассматриваемой в 3-ей главе, сравниваются существующие на настоящий момент дуговые модели: приближение ЛТР, гидродинамическую модель, гибридные двухтемпературные модели, полностью неравновесные модели, неравновесные столкновительно-радиационные модели.

В обзоре литературы посвящённой задаче диагностики неравновесной плазмы по излучению, рассматриваемой в 4-ой главе, проводится сравнение различных методов измерения концентраций возбуждённых атомов и способов учёта в них потерь излучения.

В заключительной части первой главы приводится обзор литературы, посвящённой процессу контракции тлеющего разряда и связанным с ним радиационным эффектам. Рассматриваются причины контракции: рост температуры на оси разряда, нелинейная зависимость скорости ионизации от плотности электронов, рекомбинационная гибель заряженных частиц, делается вывод об основных факторах возникновения контракции: резком радиальном спаде источников ионизации и объёмной рекомбинации. Рассматриваются сопровождающие контракцию эффекты (гистерезис), расчётные модели, описывающие контрагированный разряд, применение контрагированного разряда (источники ВУФ излучения). Отмечается необходимость разработки новых методов учёта переноса излучения, так как в существующих теоретических моделях контрагированных разрядов перенос излучения учитывается только в приближении эффективного времени жизни.

**Вторая глава** диссертации посвящена построению расчётных моделей переноса излучения в неравновесной плазме. Автор подробно рассматривает имеющуюся теорию переноса излучения (уравнение Холстейна-Бибермана) и предлагает ряд расчётных моделей, позволяющих учитывать перенос в более широких диапазонах разрядных условий по сравнению с существующими аналитическими приближениями и численными моделями. Так, для улучшения результатов, получаемых в приближении эффективного времени жизни, диссидентом предлагается использовать расчёты на основании матричного метода, в котором учитывается градиент концентрации излучающих атомов. Последнее имеет актуальность в контрагированных, искровых и других типах разрядов, где имеется существенный градиент плотности возбуждённых частиц.

В дальнейшем автор развивает матричный метод с целью учёта пространственной неоднородности коэффициента поглощения и проведения 3D расчётов в плазме с произвольной геометрией. Для решения последней задачи диссидент предлагает использовать метод трассировки лучей с дискретизацией на воксельной сетке.

Параллельно предлагаемым расчётным методам автор проводит с их помощью сравнительные и верификационные расчёты, показывающие удовлетворительное согласие, а также определяет зависимость точности вычислений от разрешения сетки.

**В третьей главе** диссертации с помощью предложенного во второй главе матричного метода расчёта переноса излучения с учётом неоднородного показателя поглощения проводятся численные исследования пленения и реабсорбции излучения в неравновесной плазме дуги в аргоне атмосферного давления. Автор строит столкновительно-радиационную модель для нахождения заселённостей нижних возбуждённых резонансных и метастабильных состояний, и ряда более высоковозбуждённых состояний атома аргона. В процессе расчёта используются входные данные из имеющихся в литературе результатов расчёта дуги не учитывающих перенос

излучения. Проведённые расчёты выявили, что при расчёте матричным методом получаются на несколько порядков большие заселённости нижних возбуждённых состояний на периферии разряда, чем при расчёте в приближении эффективного времени жизни. При этом, отличие в заселённостях более высоковозбуждённых состояний проявляются для разных методов в значительно меньшей степени, в связи с меньшей долей радиационных процессов связанных с этими уровнями.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальной диагностике неравновесной плазме по излучению. В ней рассматривается теоретическое обоснование метода, реабсорбция излучения в однородном объёмном источнике, нахождение аппаратных функций спектрального прибора, проводится сравнение результатов записанных с помощью ФЭУ и СМОС-камеры. Измерения проводились в разряде с аргоном с помощью классического метода абсорбции и метода соотношения интенсивностей линий, имеющих один верхний уровень, модифицированного для учёта реабсорбции. В результате измерений получены абсолютные и относительные заселённости возбуждённых атомов аргона, найдены области применимости и преимущества каждого из данных методов.

В **пятой главе** экспериментальным и расчётным путём исследуется влияние переноса излучения на параметры контрагированного тлеющего разряда в аргоне. Для расчётов параметров плазмы была разработана самосогласованная модель включавшая уравнение теплопроводности, уравнения баланса заряженных и возбуждённых частиц с учётом переноса излучения. Для нахождения скоростей процессов с участием электронов рассчитывалось локальное уравнение Больцмана с учётом межэлектронных и электрон-атомных столкновений. Параллельно расчётам проводились экспериментальные измерения вольт-амперных характеристик и радиальных распределений возбуждённых частиц. Последнее осуществлялось методом абсорбции с использованием просвечивающего источника. Сравнение

экспериментальных и расчётных результатов показало хорошее соответствие друг с другом.

### **Новизна полученных результатов.**

В работе содержатся результаты вносящие вклад в дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных методов исследования распространения излучения в плазме.

В диссертации предложены новые модели расчёта распространения излучения в плазменных источниках произвольной формы трёхмерной геометрии при пространственно неоднородном показателе поглощения.

В работе проведена апробация данных моделей в плазме дуги и контрагированного тлеющего разряда. Для контрагированного разряда создана самосогласованная расчётная модель с учётом переноса излучения.

Усовершенствован метод измерения пространственного распределения возбуждённых атомов в объёмных источниках света, достигнуто повышение пространственного разрешения, предложен расчёт аппаратной функции интегрального вида.

### **Научная и практическая значимость.**

Результаты работы позволяют усовершенствовать расчётные модели плазмы широкого круга разрядов, обладающих трёхмерной геометрией и неоднородными оптическими свойствами, путём учёта в них переноса излучения.

Расчёты, проведённые в диссертации на основании предложенных моделей переноса, позволили выявить влияние процессов переноса излучения на токовые характеристики и пространственное распределение возбуждённых частиц в дуговой и контрагированной плазме.

Результаты работы имеют большое практическое значение. Усовершенствование радиационных методов и исследование радиационных процессов в плазме находит применение в методах диагностики плазменных источников излучения, в технологиях плазменной обработки материалов, при исследовании ионосферы и космической плазмы.

В целом диссертация выполнена на высоком научном уровне, автором выполнен большой объём работы с использованием современных расчётных и экспериментальных методов, решён широкий круг задач.

Диссертация прошла достаточную апробацию, в том числе на международных конференциях и при публикациях в научных журналах. По теме работы опубликовано 7 статей, индексируемые Web of Science/Scopus.

Несмотря на положительные стороны работы, имеется ряд замечаний:

- 1) в главе 3 строится модель дуговой плазмы в предположении однородности в аксиальном направлении, но не приводится оценка влияния существующей на практике неоднородности,
- 2) в главе 3 столкновительно-радиационная модель дуги не содержит уравнений баланса заряженных частиц, но не объяснено почему,
- 3) в главе 5 доминирующем механизме нагрева газа в уравнении теплопроводности считаются упругие столкновения, но не приводится обоснования этому,
- 4) в главе 5 при рассмотрении причин контракции не рассматривается роль диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов аргона.

Несмотря на имеющиеся замечания считаю, что диссертационная работа «Радиационные эффекты в неравновесной плазме дуговых и тлеющих разрядов» полностью отвечает всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 28.08.2017) "О порядке присуждения ученых степеней", а сам автор, Каланов Дмитрий Валерьевич, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»,  
196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38  
тел. (рабочий): +7(812)-7041521  
email: [galnik123@rambler.ru](mailto:galnik123@rambler.ru)

доктор физ.-мат. наук  
Зверева Г.Н.

