

ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта»

На правах рукописи



**Кугушев Дмитрий Николаевич**

**«РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ  
С U-ОБРАЗНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАНАЛОМ  
ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ  
ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОЗДУХА И ПОВЕРХНОСТЕЙ»**

Специальность 2.2.1 – «Вакуумная и плазменная электроника»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Доктор технических наук  
Гавриш С.В.

Москва - 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ. ФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	14
1.1. Механизм генерирования газовым разрядом УФ-излучения и теоретические предпосылки создания эффективного импульсного источника УФ-излучения. ....	14
1.2. Анализ факторов, определяющих электрические параметры и характеристики УФ-излучения импульсного ксенонового разряда .....	17
1.2.1 Спектральные и энергетические характеристики излучения ксенонового плазменного канала.....	18
1.2.2. Влияние конструктивных характеристик и электрических параметров на эффективность импульсного ксенонового разряда.....	21
1.2.3. Факторы, определяющие пусковые характеристики импульсных ксеноновых ламп.....	26
1.2.4. Предельная энергия и долговечность .....	28
1.3. Анализ существующих конструктивных вариантов импульсной ксеноновой лампы с кварцевой оболочкой .....	31
1.4.    Обобщение факторов, определяющих характеристики УФ-излучения импульсного ксенонового разряда, и постановка задач исследования.....	36
ГЛАВА 2. РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ЛАМП.....	43
2.1. Математическое моделирование и расчетные исследования характеристик импульсного ксенонового разряда.....	43
2.1.1. Основные требования к математическим моделям разрядов импульсных газоразрядных источников излучения.....	44
2.1.2. Математическая модель нестационарного разряда в	

инертных газах и алгоритм ее реализации.....	45
2.1.3 Формирование модели с учетом движения газа в заэлектродные объемы импульсной газоразрядной лампы .....	49
2.1.4. Расчетные исследования влияния заэлектродных объемов на характеристики импульсного ксенонового разряда.....	52
2.1.5. Экспериментальное подтверждение ухода рабочего газа из плазменного канала в заэлектродный объем.....	57
2.2. Экспериментальные установки и методики исследований электрических параметров и характеристик УФ-излучения импульсных газоразрядных ламп.....	59
2.2.1. Экспериментальные источники электрического питания импульсных газоразрядных ламп.....	59
2.2.2. Методики исследования характеристик УФ-излучения импульсного ксенонового разряда.....	62
2.2.3. Методика исследования температурных полей оболочек импульсных газоразрядных ламп.....	64
2.3 Исследование зависимости электрических параметров и характеристик УФ-излучения от величины заэлектродных объемов.....	65
2.3.1 Методика эксперимента и особенности конструкции токовводов.....	66
2.3.2. Влияние величины заэлектродного объема на характеристики разряда.....	66
2.4. Расчетно-экспериментальные исследования влияния U-образной конфигурации плазменного канала на электрические параметры и температурный профиль оболочки ламп.....	69
2.4.1. Зависимость температуры разрядной оболочки от взаимного облучения двух частей U-образного плазменного канала.....	70
2.4.2. Влияние взаимного облучения двух частей U-образного	

плазменного канала на электрические характеристики разряда.....	73
2.4.3. Расчетные исследования влияния на характеристики U-образного плазменного канала коэффициента поглощения и спектра излучения ксенонового разряда.....	74
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ЛАМП</b> .....	
3.1. Особенности конструкции электрода разрабатываемой газоразрядной лампы.....	81
3.2. Научный анализ существующих результатов по исследованию температурных полей электродов.....	83
3.3. Расчет и экспериментальное исследование температурного профиля электрода.....	84
3.3.1. Разработка методики и расчетные исследования продольного температурного поля электрода.....	85
3.3.2. Разработка методики и экспериментальное исследование продольного температурного поля электрода.....	87
3.4. Разработка технологии изготовления комбинированного электрода газоразрядной лампы.....	89
3.4.1. Теоретический анализ свойств материалов спая с позиций устойчивости к воздействию плазмы.....	90
3.4.2. Экспериментальные исследования физико-химических процессов при формировании спая элементов электрода.....	92
3.5. Разработка соединения кварцевой разрядной трубки с электронным узлом.....	95
3.5.1 Анализ существующих конструктивных и технологических решений спаев электродных узлов с кварцем.....	96
3.5.2. Особенности конструкции спая и теоретические предпосылки реализации предлагаемой технологии.....	98
3.5.3. Термодинамический анализ взаимодействия материалов спая.....	102

3.5.4. Исследование химического взаимодействия в процессе формирования спая.....	105
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННЫХ ЛАМП...	109
4.1. Процессы формирования плазменного канала при выходе импульсной лампы в номинальный режим работы.....	109
4.2. Пространственное распределение излучения лампы.....	114
4.2.1 Теоретический анализ факторов, определяющих пространственное распределение излучения газоразрядной лампы.....	115
4.2.2. Методика исследования индикатрис излучения импульсных газоразрядных ламп.....	117
4.2.3. Исследование индикатрисы импульсной ксеноновой лампы с U-образной конфигурацией разрядной дуги.....	118
4.3. Особенности работы разработанной лампы с внешней колбой.....	121
4.4. Сопоставление характеристик разработанной газоразрядной лампы с серийным образцом.....	126
4.4.1. Сравнение электрических характеристик разработанного источника УФ-излучения с серийным образцом импульсной лампы.....	127
4.4.2. Исследование срока службы разработанной лампы.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	134
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1. Личный вклад автора в получение научных результатов публикаций по теме диссертации.....	149
Приложение 2. Акты внедрения результатов диссертации.....	154

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время использование импульсного ксенонового разряда в качестве источника ультрафиолетового (УФ) излучения позволило в ООО «НПП «Мелитта» (г. Москва) впервые в мире создать и внедрить в серийное производство инновационную плазменно-оптическую технологию обеззараживания воздуха и открытых поверхностей помещений (Патенты RU2001629, RU2396092, US6264802 и др.). Преимуществами разработанного метода является, во-первых, высокая интенсивность импульсного УФ-излучения опико-электронных систем (ОЭС) обеззараживания, в сотни раз превышающая мощность излучения самых эффективных бактерицидных установок с ртутными лампами низкого давления, что сокращает на порядок время дезинфекции помещений [1 – 6]. Во-вторых, излучение импульсного ксенонового разряда обладает сплошным спектром в диапазоне 200 – 300 нм и, следовательно, оказывает многоканальное разрушающее действие на основные структуры клетки бактерий (ДНК, РНК, мембраны, белки и др.) [1, 7, 8]. Поэтому для обеспечения бактерицидной эффективности не менее 99,9% в случае использования импульсного УФ-излучения требуется энергетическая экспозиция (доза) на порядок ниже, чем при облучении поверхности ртутными лампами низкого давления. В-третьих, импульсные ксеноновые лампы не содержат ртути и других токсичных химических веществ, поэтому являются экологически чистыми [1 – 6].

Конструктивно импульсная газоразрядная лампа представляет собой наполненную ксеноном разрядную трубку из оптически прозрачного в УФ-диапазоне кварцевого стекла (кварца), в концевых частях которой установлены электродные узлы [8]. Генерация излучения плазменным каналом осуществляется при разряде накопительного конденсатора, емкость которого в совокупности с величиной приложенного рабочего напряжения определяют энергию и длительность вспышки [7, 8].

Из научных источников известно, что для увеличения мощности УФ-излучения требуется повышение электрической энергии, вкладываемой в ксеноновый разряд. На сегодняшний день такой способ улучшения эффективности га-

зоразрядной лампы реализовать в полной мере невозможно в силу двух ограничений.

Во-первых, кварцевое стекло, используемое в качестве материала оболочки, ограничивающей ксеноновый разряд, выдерживает средние удельные электрические нагрузки до  $W_{уд.н} = 50 \text{ Дж/см}^2$  при длительностях вспышки до 200 мкс [9 – 13]. Превышение указанных пределов приводит к испарению оксида кремния с внутренней поверхности колбы, контактирующей с плазмой, и как следствие, к падению КПД излучения и долговечности импульсной лампы [9 – 13].

Во-вторых, сегодня в импульсных лампах отечественного производства применяется единая конструкция электродного узла, герметизация которого осуществляется обжатием кварцевым стеклом тонкой молибденовой фольги, которая не выдерживают токовые нагрузки более 50А [8, 14, 15].

В силу приведенных ограничений сегодня срок службы серийных импульсных источников УФ-излучения не превышает  $2,5 \cdot 10^6$  импульсов. Поэтому для устранения указанных недостатков необходимо увеличить габаритные размеры плазменного канала и повысить площадь сечения токоввода в разрядный объем лампы. В первом случае для обеспечения компактности газоразрядной лампы разработчикам приходится прибегать к U-образной конфигурации разрядного промежутка [8, 14 – 16], а вторая задача за рубежом решается использованием колпачково-стержневых токовводов [17]. Такие изменения конструкции разрядной трубки неизбежно приводят к трансформации теплофизического состояния лампы, изменению электрических параметров и характеристик излучения ксеноновой плазмы.

Поэтому сегодня при разработке конструкции импульсного источника УФ-излучения с указанными техническими решениями становится **актуальной** задача проведения исследований процессов в ксеноновой плазме, ограниченной кварцевой оболочкой, во взаимосвязи с режимами электрического питания, особенностями конструкции токовводов в разрядный объем и условиями эксплуатации импульсной лампы в составе ОЭС обеззараживания воздуха и поверхностей помещений.

**Целью диссертационной работы** является разработка импульсного ксенонового газоразрядного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом, обеспечивающего максимальную энергетическую экспозицию в спектральном диапазоне 200 – 300 нм при сроке службы выше  $2,5 \cdot 10^6$  импульсов.

**Поставленная цель включает решение следующих задач:**

1. Посредством анализа научно-технической литературы, определить основные параметры и характеристики разрабатываемого газоразрядного источника ультрафиолетового излучения.

2. Разработать методики и сформировать аппаратное обеспечение для исследования электрических параметров, спектральных и энергетических характеристик УФ-излучения.

3. Доработать математическую модель импульсного ксенонового разряда в части учета ухода рабочего газа в балластный объем и выполнить расчетные и экспериментальные исследования факторов, влияющих на электрические параметры разряда и временные, спектральные и энергетические характеристики УФ-излучения разрабатываемой конструкции газоразрядной лампы.

4. Разработать конструкцию газоразрядного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом и токовводами, рассчитанными на работу в условиях повышенных токовых нагрузок.

5. Исследовать физические и химические процессы, происходящие в материалах элементов конструкции при изготовлении и эксплуатации создаваемой газоразрядной лампы, разработать рекомендации по формированию технологии ее серийного производства.

6. Изучить характеристики разработанной импульсной ксеноновой лампы на соответствие эксплуатационным требованиям, предъявляемым к ОЭС для обеззараживания воздуха и открытых поверхностей помещений.

**Научная новизна диссертации** заключается в том, что **впервые:**

1. Математическая модель импульсного ксенонового разряда в приближении локального термодинамического равновесия, дополнена системой уравнений, включающей уравнения сохранения энергии, неразрывности плазмы и переноса

излучения в балластных объемах при их заполнении плазмообразующей средой в течение прохождения импульса тока, что позволило увеличить точность расчетов параметров плазмы за счет учета ухода рабочего газа из межэлектродного промежутка.

2. Реализация доработанной математической модели позволила получить временные зависимости плотности тока, давления в межэлектродном пространстве и эффективного давления в импульсной лампе в ходе формирования квазистационарной стадии разряда и дальнейшего остывания плазмы. Экспериментально установлено, что при сохранении неизменным разрядного объема  $V_p$  с увеличением заэлектродного объема  $V_z$ , происходит снижение плотности разрядного тока и энергетической экспозиции в спектральном диапазоне 200 – 300 нм. Полученные расчетные и экспериментальные данные позволяют при конструировании импульсных ламп выбирать исходное давление ксенона в разрядном объеме в зависимости от размера балластных областей.

3. Доказано экспериментально, что в процессе работы импульсной лампы с U-образным плазменным каналом воздействие излучения каждой из двух его параллельных частей приводит к росту температуры оболочки и повышению плотности разрядного тока в зависимости от спектра излучения импульсной ксеноновой лампы, что дает возможность прогнозировать параметры газоразрядных приборов с различными конфигурациями разряда и составами плазмообразующих сред.

4. Предложена методика расчета конструкции электродов, построенная на решении уравнения теплопроводности с учетом потери энергии излучением по закону Стефана – Больцмана, позволяющая определять температурный профиль электрода в зависимости от режимов разряда.

5. Представлены результаты исследований физических и химических процессов в материалах конструкции при пайке электрода и кварцевой оболочки разрядной трубки металлическими припоями, обеспечивающие надежность разработанной лампы и использование предложенной технологии в других газоразрядных приборах.

6. Исследования термодинамическим методом временной зависимости повышения температуры анода и катода при выходе лампы в номинальный режим работы во взаимосвязи с процессами в плазменном канале, изучение пространственного распределения излучения и влияния внешней оболочки на теплофизическое состояние разрядной трубки, позволили сформировать технические требования к условиям эксплуатации импульсного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом в составе ОЭС обеззараживания.

**Теоретическая и практическая значимость.** Научная значимость работы состоит в том, что комплекс представленных результатов, научных положений и выводов диссертационной работы, полученных при исследовании импульсного ксенонового разряда, способствует формированию новых знаний в области плазменной электроники, позволяет понять влияние конструктивных параметров газоразрядной лампы на характеристики плазмы и эффективность ее излучения.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что:

1. Полученные в работе экспериментальные и расчетные результаты позволили впервые в России приступить к опытному производству импульсных ксеноновых ламп с колпачково-стержневым токовводом в составе ламповых узлов ФК 22/150 (МЮРА.433224ТУ) для типоряда установок обеззараживания УИК6-01-«Альфа», Уанех-2М, «Альфа-06».

2. Предложенные технические решения конструкции лампы в целом и ее отдельных узлов (электрод, оболочка, токоввод и т.д.) и разработанные технологические процессы (пайка, магнетронное напыление комбинации металлических слоев, лазерная сварка и т.д.) позволили снизить расход дорогостоящих материалов, повысить пооперационный процент выхода годных изделий и узлов, обеспечить надежность созданного импульсного источника УФ-излучения.

3. Экспериментальные и расчетные данные были использованы в разработках и серийном производстве ООО «НПП «Мелитта» (г. Москва), ОКБ «Гранат» АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (г. Москва), АО «КБточмаш им. А. Э.

Нудельмана» (г. Москва), о чем свидетельствуют Акты внедрения, прилагаемые к диссертации.

4. Разработанные конструкторские решения импульсных ксеноновых ламп могут быть использованы для усовершенствования новых плазменных устройств, обладающих повышенными токовой нагрузкой и долговечностью, например, источники накачки лазеров, светосигнальные газоразрядные лампы и т.д.

**Методология и методы исследований.** В работе использован комплексный подход к проведению исследований, включающий построение математических моделей, создание базы данных, программную реализацию расчетов по модели, исследования макетов и опытных образцов на экспериментальных установках и в составе серийных изделий методами, удовлетворяющими требованиям государственных стандартов (ГОСТ 30831-2002, ГОСТ 16263-70, ГОСТ 25359-82 и т.д.), РМ 11 337.005-78, выполнение конструкторских и технологических исследований на современном производственном и диагностическом оборудовании, прошедшем аттестацию по стандартным методикам.

При изучении структуры и свойств конструкционных материалов использовались методы поляризационной микроскопии (микроскопы МПС-1 и полярископ ПКС-250), рентгеноструктурного анализа (рентгенофлуорисцентный анализатор FISCHERSCOPE X-RAY), исследования непрозрачных объектов в отражённом свете (металлографический микроскоп ММР-4).

При выполнении экспериментов применялись известные и специально разработанные методики и аппаратура электрических (делитель напряжения 1:1000, трансформатор тока LT 10000-S, киловольтметр С 511, нановольтметр В2-38), осциллографических (осциллографы С9-8, DS1052 E), фотометрических (УФ-радиометр ТКА-ПКМ, Аргус-06), спектрометрических (монохроматоры МДР-23, спектрофотометр СФ-2000, ИК-Фурье спектрометр ФСМ-1201), калориметрических (термоэлемент РТН-10С, измеритель мощности лазерного излучения ИМО-2Н), пирометрических (тепловизионная система SDS HotFind-LXT) исследований параметров импульсного газоразрядного источника УФ-излучения.

Некоторые результаты исследований получены по методикам и на экспериментальной базе научно - исследовательских институтов НИУ МИЭТ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, АО «НИИ «Элпа», ФГУП «НИИП», предприятий АО «Руспром» и ФГУП «НИИ НПО «Луч», при непосредственном участии в экспериментах автора диссертации.

### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Показано, что при средней удельной электрической мощности импульсной лампы 30 Вт/см в плазменном канале из-за ухода ксенона в балластные объемы давление газа в межэлектродном промежутке снижается на 40 – 50%, поэтому уменьшение отношения балластного заэлектродного объема к величине разрядного объема с 0,3 до 0,15 позволяет увеличить энергетическую экспозицию в спектральном диапазоне 200 – 300 нм более чем на 7 %.

2. Установлено, что при средней удельной мощности 30 Вт/см в импульсной ксеноновой лампе с U-образным плазменным каналом поглощение разрядом возвращенного обратно собственного излучения с длинами волн более 0,8 мкм приводит к увеличению плотности тока, и как следствие, повышению энергетической экспозиции на 12 % выше, чем у прямых импульсных источников УФ-излучения с аналогичными размерами межэлектродного пространства.

3. Определено, что в сравнении с серийными импульсными источниками УФ-излучения разработанные конструкция и технология импульсной ксеноновой лампы с U-образным плазменным каналом позволяет повысить срок службы с  $2,5 \cdot 10^6$  до  $10^7$  импульсов и увеличить выход годных изделий с 50 – 60% до 80 – 90%.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается систематическим характером экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании, проведенных по стандартным методикам при удовлетворительном согласовании полученных данных с расчетно-теоретическими моделями, использованием комплекса современных физических, химических и металлографических способов исследований с многократной воспроизводимостью результатов

экспериментов, проанализированных с применением современных методов обработки результатов измерений и практической проверкой сделанных научных выводов и рекомендаций в процессе эксплуатации разработанных газоразрядных источников УФ-излучения в серийно выпускаемых ОЭС для обеззараживания воздуха и открытых поверхностей помещений.

Научные положения, сформулированные в диссертационной работе, удовлетворительно согласуются с общепризнанными физическими теориями, результатами расчетов и экспериментов, представленных в многочисленных литературных источниках по тематике газового разряда, материаловедения и метрологии.

**Апробация работы.** Основные научные результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике (г. Москва, 2009 г.), VII Международной светотехнической конференции (Хабаровск, 2009), XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2020 г.), на VI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии «ЛаПлаз – 2021», X Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2021 г.). IV Международной конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (г. Брянск, 2020 г.), Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" (г. Воронеж, 2020г.), Всероссийской конференции «Радиационная стойкость электронных систем» (г. Лыткарино, 2010 г.), Международной конференции «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (Томск, 2020 г.), Международной конференции «Инженерные системы – 2020» (Москва, 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов» (Курск, 2020 г.), на 11 научных семинарах и совещаниях в ООО «НПП «Мелитта», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОКБ «Гранат» АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (г. Москва), АО «КБточмаш им. А. Э. Нудельмана» (г. Москва).

## **ГЛАВА 1. НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ. ФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Проблема создания мощных источников высокоинтенсивного УФ-излучения остро ставит задачу разработки конструкции импульсных ламп, рассчитанных на высокие энергии вспышек при обеспечении максимально возможного срока службы. Выпускаемые промышленностью сегодня импульсные лампы типов ИНП и ИФП, не могут обеспечить в полной мере указанное требование, так как обладают существенным недостатком, а именно, тем, что их электродные узлы выполнены на базе фольгового ввода, ограничивающего получение высоких токовых нагрузочных характеристик [8, 16, 17 – 20]. Поэтому данная глава посвящена последовательному решению следующих задач:

- изучению условий генерирования плазмой ультрафиолетового излучения,
- выявлению взаимной зависимости факторов, определяющих параметры излучения, срок службы и пусковые характеристики импульсных газоразрядных ламп,
- сравнению существующих технических решений разрядных источников излучения и выбор базовой конструкции,
- из анализа особенностей избранного конструктивного исполнения формулировке основных направлений исследований, направленных на повышение характеристик УФ-излучения и надежности разрабатываемой лампы.

### **1.1. Механизм генерирования УФ-излучения и теоретические предпосылки создания эффективного импульсного источника УФ-излучения.**

Теоретическому рассмотрению явлений в газовом разряде, ограниченном оболочкой, посвящены научные монографии зарубежных авторов А.М. Ховатсона [21], В. Финкельнбурга, Г. Меккера [22], Л.И. Леба [23] и др. Значительный вклад в развитие научного понимания процессов, происходящих в плазмообразующей среде при прохождении импульса тока, внесли работы отечественных исследова-

телей И.С. Маршака [8], Я.Б. Зельдовича [24], Ю.П. Райзера [24, 25], Ю.Г. Басова [14], Г.А. Месяца [26], В.М. Градова [27 – 31] и др. На основании теоретических работ перечисленных авторов проанализируем теплофизические процессы в плазме, приводящие к формированию ультрафиолетового излучения.

Принципиально механизм генерации газовым разрядом УФ-излучения не отличается от процесса получения свечения во всем оптическом диапазоне, т.е. он связан с изменением энергии электронов, входящих в состав плазмообразующей среды [8, 21 – 23, 25]. При возбуждении атомов при низких давлениях (НД) газа и малых плотностях тока, когда вторичные процессы не оказывают существенного влияния на термодинамическое состояние разряда, основным механизмом, приводящим к образованию возбужденных частиц, является процесс соударения нейтральных атомов с быстрыми электронами. По этой причине в разрядах НД преобладает резонансное излучение, выход которого может достигать 80 – 90% от подводимой к плазменному столбу мощности [20, 22]. Учитывая, что резонансные линии ксенона 146,9 нм (8,45 эВ) и 129,5 нм (9,56 эВ) расположены вне левой границы прозрачности (около 200 нм) существующих материалов оболочек газоразрядных ламп (кварц и сапфир), а также вне спектральной области биоцидной эффективности УФ-излучения, то разряд низкого давления в этом газе не представляет интереса для решения задач обеззараживания [20].

Из монографий [20, 21] следует, что при отсутствии вторичных процессов энергетический поток резонансного излучения с единицы длины плазменного канала пропорционален числу столкновений атомов с электронами  $z$ :

$$F = h\nu z = h\nu c n_0 N_e e^{\frac{eU_1}{kT_e}}, \quad (1.1)$$

где  $N_e$  – количество электронов на единицу длины столба;  $n_0$  – концентрация нормальных атомов,  $U_1$  – потенциал возбуждения резонансной линии,  $e$  – заряд электрона,  $k$  – константа Больцмана,  $h\nu$  – энергия кванта,  $c$  – константа,  $T_e$  – электронная температура.

Из уравнения (1.1) следует, что при наращивании концентрации атомов  $n_0$  последует рост интенсивности лучистого потока линии резонансного излучения.

Однако, это явление происходит не во всех случаях. Наиболее распространенным способом увеличения количества излучающих атомов и свободных электронов является повышение давления плазмообразующей среды и плотности тока. По мере роста давления газа число соударений и, как следствие, актов обмена энергией между атомами и электронами, возрастет, что приведет к сближению их температур, т.е. получению изотермической плазмы [21, 22, 24, 25]. Такие разряды характеризуются более высокими удельными мощностями и плотностями излучения, наличием высоких градиентов температур от оси к периферии разряда, возрастанием поглощения резонансных линий. Таким образом, по мере повышения плотности газа и диаметра разрядного канала (толщины слоя плазмы) поглощение плазмы будет расти и может достичь такого значения, при котором резонансное излучение не сможет выйти из разряда [8, 21, 23, 25].

Для нерезонансного излучения поглощение в плазме незначительно, так как этот процесс осуществляется, в основном, возбужденными атомами, концентрация которых плавно убывает от оси разряда к периферии. Поэтому в изотермических разрядах преобладает излучение нерезонансных линий [14, 22, 23, 27]. По этой причине в качестве основного направления исследований по созданию высокоинтенсивного источника УФ-излучения необходимо выделить повышение эффективности нерезонансного излучения ксеноновой плазмы. В частности, при высоких электрических нагрузках, характерных для импульсных источников излучения, плотность тока и температура плазмы велики (до  $5 - 6 \text{ кА/см}^2$  и  $10000 - 12000 \text{ К}$ ), в испускаемой энергии преобладает излучение рекомбинационно – тормозного характера, имеющее сравнительное равномерное распределение энергии по спектру в широком диапазоне длин волн [8, 28, 29].

Поскольку сегодня в качестве эффективного источника УФ-излучения применяются импульсные ксеноновые лампы [1 – 6], рассмотрим возможности изменения спектра данного типа разряда. Как было показано выше, при увеличении вводимой в ксеноновый разряд мощности, повышается доля сплошного спектра по сравнению с линейчатым. Это связано с увеличением температуры и концентрации электронов. Излучение континуума обусловлено рекомбинацией электрон

– ион, вероятность которой определяется как квадрат концентрации электронов, а интенсивность линий пропорциональна количеству электронов в единице разрядного объема. Поэтому при увеличении удельной мощности разряда, кроме роста доли излучения континуума, происходит перераспределение энергии по спектру излучения плазмы, например, заметно увеличивается интенсивность в ультрафиолетовой части спектра при незначительном росте в видимой и инфракрасной областях. Это объясняется тем, что коэффициент поглощения плазмы в видимой и ИК областях спектра увеличивается примерно в 10 раз быстрее, чем в УФ-диапазоне [27 – 31]. Поэтому излучение в видимой и ИК областях спектра приближается к излучению «черного тела», а наблюдаемое при росте  $P_{уд.}$  незначительное увеличение интенсивности в этом диапазоне длин волн обусловлено ростом температуры, которую можно приблизительно представить как  $T \sim j^{1/5}$  [8], где  $j$  – плотность тока в разряде.

В итоге, представляется возможным повышение выхода излучения в УФ области спектра за счет наращивания вводимой мощности в разряд. Такой способ одновременно приводит к негативным последствиям, а именно, снижаются прочностные свойства оболочки, происходит испарение кварцевых стенок, приводящее к изменению состава плазмообразующей среды, экранированию и сдвигу границы пропускания кварца и т.д. [8, 9, 10, 12].

Таким образом, возникает задача проведения теоретического и экспериментального анализа с целью поиска компромисса между конструктивными параметрами и условиями эксплуатации импульсной ксеноновой газоразрядной лампы высокого давления, обеспечивающего максимальную эффективность УФ-излучения и срок службы при наращивании вкладываемой в разряд мощности.

## 1.2. Анализ факторов, определяющих электрические параметры и характеристики УФ-излучения импульсного ксенонового разряда.

Многообразие параметров, определяющих эффективность импульсного источника УФ-излучения, требует проведения анализа научно-технической литературы, позволяющего оценить современные достижения в области исследований

газового разряда и, тем самым, сузить область поиска оптимальной конструкции разрабатываемой газоразрядной лампы. К сожалению, количество работ, посвященных данной проблеме, ограничено [8, 9 – 12, 19] и результаты этих исследований получены в конце прошлого века, поэтому основное внимание в данном разделе будет сосредоточено не только на изучении путей увеличения мощности свечения в УФ области, но и способов повышения общего КПД излучения импульсной ксеноновой лампы.

### 1.2.1. Спектральные и энергетические характеристики излучения ксенонового плазменного канала

Практически все современные типы серийных импульсных газоразрядных ламп наполняются ксеноном. Другие наполнения (криптон, аргон, смеси газов) [8, 18] практического применения еще не нашли, так как получаемое в некоторых случаях повышение интенсивности излучения в отдельных участках спектра неоправданно по сравнению с ухудшением других эксплуатационных характеристик ламп, таких как долговечность, управляемость, стабильность параметров и др. Исключения составляют несколько типов маломощных криптоновых ламп, применяемых в недавнем прошлом для накачки алюмоиттриевого граната с неодимом [18]. Эффективность накачки активного элемента этими газоразрядными лампами при небольших энергиях (10-30 Дж) примерно вдвое больше, чем у ксеноновых, но с увеличением энергии это преимущество исчезает [8, 18,].

Энергетический выход излучения импульсных ксеноновых ламп обычно составляет 50 – 60 % [32]. При небольших давлениях ксенона ( $1,3 - 2,6 \cdot 10^4$  Па) или малых плотностях тока (до  $2000 \text{ А/см}^2$ ) излучаются линии, наиболее интенсивные в ближней ИК-области спектра. При повышении давления (более  $3,9 \cdot 10^4$  Па) и плотности тока (более  $3000 \text{ А/см}^2$ ) спектр излучения становится сплошным с максимумом в области 300 – 500 нм [32, 33]. Дальнейшее увеличение плотности тока сопровождается повышением температуры плазмы, и максимум излучения смещается в направлении коротких длин волн (рисунок 1.1), а КПД в ИК области спектра снижается (рисунок 1.2., кривая 4) [34].

Спектральная плотность КПД (отношение спектральной плотности энергии излучения в единичном телесном угле к энергии разряда) характеризует эффективность преобразования электрической энергии в излучение различных длин волн и для серийных ламп перераспределяется по спектру относительно медленно при длительности тока более 0,3 мс и диаметре разрядной трубки 0,5 – 3 см [34]. Это позволяет с приемлемой для практики точностью определять КПД ламп в соответствующих спектральных интервалах в зависимости от удельной мощности, выделяемой в столбе разряда. Спектральная плотность КПД в «жестких» режимах разряда (длительность тока менее 0,3 мс) в УФ области спектра может достигать значений, в 2 – 4 раза более высоких, чем при длительных разрядах и той же удельной мощности (рисунок 1.2., таблица 1.1).

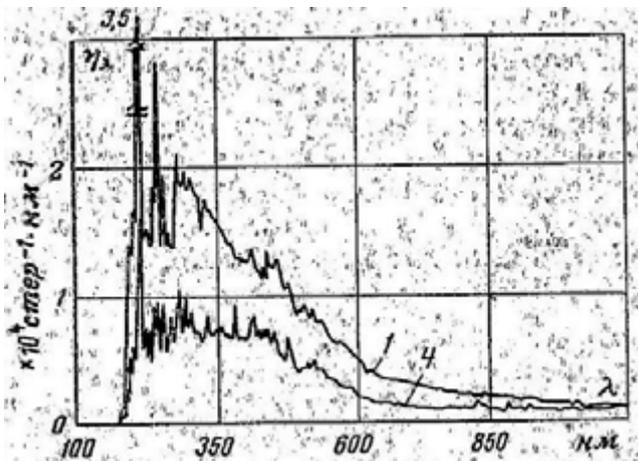


Рисунок 1.1. Спектральные КПД лампы ИФП-1200 [33].

1, 4 – номера режимов в соответствии с таблицей

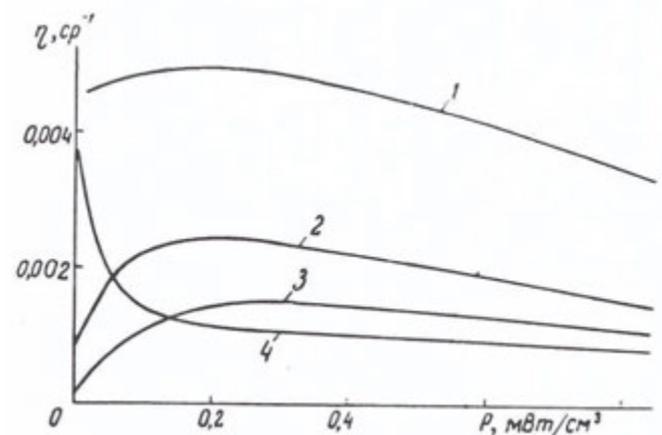


Рисунок 1.2. КПД излучения ксенонового разряда в спектральных диапазонах 200 – 1100 (1), 400 – 700 (2), 220 – 400 (3), 700 – 1100 (4) нм и единичном телесном угле для диаметров трубки  $0,7 \leq d \leq 1,8$  см в зависимости от удельной электрической мощности [34].

Спектральный КПД импульсной ксеноновой лампы ИФП-1200  
в различных режимах разряда [33].

Номер режима	Режимы работы				Спектральный КПД в диапазонах, нм			
	Напряжение на рабочем конденсаторе, кВ	Емкость рабочего конденсатора, мкФ	Индуктивность разрядного контура, мкГн	Энергия разряда, кДж	180-250 нм	250-300 нм	300-350 нм	350-400 нм
1	2,4	300	30,0	0,86	9,1	7,8	8,2	6,9
2	1,3	1000	1,0	0,84	2,7	3,1	4,6	4,6
3	1,8	300	1,0	0,49	6,6	6,2	7,1	6,1
4	3,5	50	1,0	0,31	3,7	3,7	3,3	3,3

**Примечание:** Спектральный КПД в указанных диапазонах приведен в процентах от общего КПД в интервале длин волн 180 – 1100 нм.

Максимумы кривых спектрального КПД сдвигаются в коротковолновую ультрафиолетовую область 200 – 300 нм. Известно [8], что у ксенона в интервале 180 – 247 нм нет спектральных линий, но в исследуемых «жестких» (длительность вспышек 32 – 360 мкс) режимах наблюдалось линейчатое излучение в этой области. Наиболее мощное излучение приходится на длину волны 220 нм. Источником его, по-видимому, являются пары кремния, возникающие в разряде при испарении кварца. Подтверждением сделанного предположения служат работы [8, 33, 35, 36], в которых утверждается что импульсный разряд в ксеноне, ограниченный стенками кварцевых трубок, характеризуется интенсивным испарением оболочки, диссоциацией двуокиси кремния и появлением мощных линий излучения кремния на длинах волн, близких к 220, 245, 251, 253 и 288 нм. Уменьшение атомного веса инертного газа, наполняющего разрядный объем, приводит к росту температуры плазмы [8]. Следствием этого должны явиться интенсификация процессов испарения кварца, повышение концентрации паров кремния в разряде и усиление мощности излучения последнего в УФ области спектра. Однако при переходе от ксенона к инертному газу с меньшим атомным весом снижается излучательная способность разряда [8]. По этой причине в данной работе целесообразно сосредоточиться на разработке импульсной ксеноновой лампы.

Индикатрисы энергетического освечивания в различных областях спектра, характеризующие пространственное распределение энергии излучения импульсных ламп, полностью определяются оптической плотностью плазмы – произведением показателя поглощения плазмы на диаметр столба разряда [37]. Для газоразрядных ламп эквивалентные телесные углы (отношение энергии излучения в данном спектральном интервале к энергетическому освечиванию в том же интервале в направлении нормали к оси лампы) в среднем на 5 – 8% меньше обычно принимаемого значения (11,3 ср) для стеклянных импульсных ламп [8, 38 – 40], работающих при меньших удельных мощностях.

Важно отметить, что в работах [8, 38, 40] пространственное распределение излучения изучено в видимом диапазоне и исключительно у прямых импульсных ксеноновых ламп. Проведенный нами анализ литературных источников результатов исследований индикатрис газоразрядных ламп в УФ области спектра со сложной конфигурацией плазменного канала не выявил, поэтому для практических задач обеззараживания такие экспериментальные работы, несомненно, актуальны.

Таким образом, из теоретического анализа, проведенного в данном разделе, следует основной вывод, что в основу проводимой разработки должно быть положено исследование импульсного ксенонового разряда короткой длительности.

### 1.2.2. Влияние конструктивных характеристик и электрических параметров на эффективность импульсного ксенонового разряда.

В данном разделе рассматривается влияние на свойства импульсного ксенонового разряда одновременно параметров цепи электрического питания и конструктивных характеристик газоразрядной лампы. Причина такого подхода обусловлена тем, что изменение размера рабочего объема и состава плазмообразующей среды повлечет за собой необходимость корректировки параметров разряд-

ного контура для получения максимального выхода излучения и обеспечения требуемой долговечности газоразрядной лампы.

В работах [41 – 44] подтверждается, что для разрядного контура, нагрузкой в котором служит импульсная лампа, для получения коротких импульсов тока существует оптимальное соотношение параметров элементов электрической цепи. Кратко рассмотрим некоторые расчетные зависимости характеристик ксеноновой плазмы и параметров разрядного контура.

В предположении, что все элементы электрической схемы имеют суммарную индуктивность  $L$  и общее активное сопротивление  $R$ , изменение характеристик разрядного контура можно описать уравнением

$$L(t) \frac{di}{dt} + R(t)i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = U_0 \quad (1.2)$$

где  $U_0$  – начальное напряжение на рабочем конденсаторе емкостью  $C$ . Для трубчатых газоразрядных ламп с разрядом короткой длительности для момента времени, соответствующего максимуму тока, в работе [45] получено соотношение между удельной электропроводностью плазмы  $\sigma$  и плотностью тока  $j$  в виде

$$\sigma = 0,48 j^{-0,5}. \quad (1.3)$$

Сопротивление импульсной газоразрядной лампы согласно [41] можно представить в виде:

$$R = \frac{kl}{\sqrt{jS}}, \quad (1.4)$$

где  $k$  – параметр, зависящий от рода и давления газа;  $j$  – плотность тока;  $l$  и  $S$  – длина разрядного канала и площадь его поперечного сечения соответственно. Таким образом, параметр  $k$  позволяет судить о влиянии начального давления на величину удельного сопротивления при фиксированной плотности тока.

Выполненная в работе [41] обработка данных различных авторов позволила получить эмпирическую формулу  $k$ :

$$k = 0,41 + 0,03\sqrt{p_0} , \quad (1.5)$$

где  $p_0$  начальное давление в мм рт. ст.

По результатам исследования низкоиндуктивного разрядного контура авторами работы [43] выявлено, что для получения наименьшей длительности импульса разряда должно выполняться условие:

$$\left(\frac{LU_0^2}{C}\right)^{\frac{1}{4}} = \frac{2,67l}{\sqrt{S}} \quad \text{или} \quad W = 2,54 \frac{l^4 C^2}{S^2 L} , \quad (1.6)$$

где  $W = \frac{CU^2}{2}$ ;  $S$  – поверхность разряда.

В этом случае длительность будет наименьшей и, как следует из работы [43], равной:

$$t_{0,35} = 2,3\sqrt{LC} \quad (1.7)$$

Наличие в формуле (1.6) геометрических параметров ламп и параметров контура позволило в работе [43] связать их с плотностью тока, через которую определить яркостную температуру плазмы и оптические характеристики источников света.

Для цилиндрической излучающей поверхности в [43] предлагается следующее выражение:

$$T_{\text{я}} = 585 j_0^{\frac{3}{8}} \left( \eta \frac{S_0}{d} \right)^{\frac{1}{4}} , \quad (1.8)$$

где  $d$  – диаметр разряда.

В этой же работе [43] получено выражение для яркостной температуры, связывающее энергию разряда и геометрические размеры плазменного канала:

$$T_{я} = 555 \left( \frac{\eta W}{LG} \right)^{\frac{3}{16}} \quad (1.9)$$

где  $G$  – геометрический фактор, который для трубчатых ламп определяется как  $d^{8/3}$

Приведенные уравнения (1.2) – (1.9) характеризуют связь параметров разряда с конструктивными параметрами газоразрядной лампы. В дальнейшем изложении расчеты по указанным уравнениям будут сопоставляться с экспериментальными результатами наших исследований.

Далее рассмотрим некоторые экспериментальные результаты различных авторов по изучению влияния рассмотренных факторов на интенсивность УФ-излучения импульсного ксенонового разряда. Эффективность импульсных газоразрядных ламп зависит прежде всего от плотности тока (например, уравнение (1.8)). При очень малых плотностях тока, когда удельная мощность разряда приближается к удельной мощности тепловых потерь, полный КПД излучения импульсного ксенонового разряда резко снижается. Чем меньше атомный вес газа, тем раньше начинается резкое снижение КПД излучения [8]. Так в работе [41] исследовалось влияние начального давления  $p_0$  наполняющего газа (ксенона, 60 – 600 мм рт. ст.) на величину удельного сопротивления  $\rho$  газоразрядной плазмы (уравнения (1.4) и (1.5)), а также на величину начальной плотности тока  $j$  в серийных лампах ИФП-1200, ИФП-5000 с внутренними диаметрами 7 и 11 мм.

Выявлено, что при фиксированной начальной напряженности электрического поля плотность тока растет с повышением начального давления, а при фиксированном начальном давлении ксенона с увеличением напряженности электрического поля.

Как показали проведенные в работе [47] исследования, в разряде микросекундных длительностей увеличение удельной мощности не приводит к заметному росту КПД УФ-излучения (рисунок 1.3), что является следствием его экранировки расплавленным слоем кварцевой стенки. Зависимость КПД УФ-излучения ламп с разрядом короткой длительности от диаметра трубки является весьма сильной, причем максимум КПД появляется при различных удельных мощностях разряда. Такое поведение кривых (рисунок 1.3) объясняется конкуренцией эффектов, связанных с ростом оптической толщины плазмы при увеличении диаметра и изменении доли потерь на единицу поверхности трубки, вызывающей сдвиг УФ границы поглощения кварца.

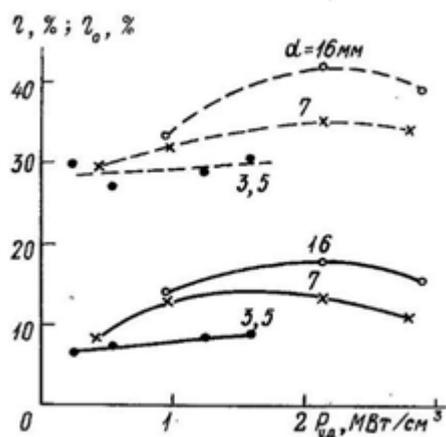


Рисунок 1.3. Зависимость КПД УФ-излучения  $\eta$  (—) для  $\Delta\lambda=185\div360$  нм и его доли  $\eta_0$  (- - -) в полном потоке излучения импульсных ламп разного диаметра от удельной мощности разряда при  $p_0=50$  мм рт. ст. [46]

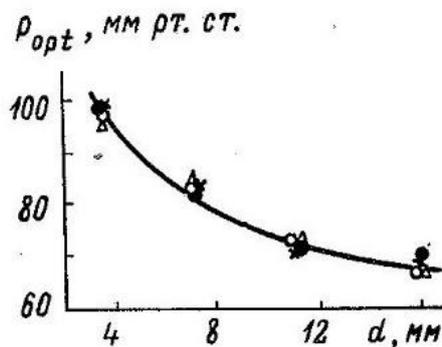


Рисунок 1.4. Зависимость начального давления ксенона, оптимального для получения максимального выхода излучения в области  $\Delta\lambda=185\div350$  нм, от диаметра импульсной лампы для удельной мощности разряда 0,3 МВт/см<sup>3</sup> (●); 0,7 МВт/см<sup>3</sup> (x); 1,5 МВт/см<sup>3</sup> (O) и 2 МВт/см<sup>3</sup> (Δ) [46]

Поскольку показатель поглощения ксеноновой плазмы растет с длиной волны [37], то для видимого и ближнего ИК-диапазонов излучения плазма близка к оптически плотной. В этом случае, как показали эксперименты [41], диаметр

практически не сказывается на изменении ее КПД в указанной области спектра. В УФ области, где оптическая плотность невелика, прирост интенсивности излучения почти пропорционален диаметру, что приводит к увеличению КПД с ростом диаметра.

Начальное давление газа не влияет на оптическую толщину плазмы, поэтому для ламп различных диаметров максимальный выход излучения наблюдается при отличающихся давлениях ксенона. В монографии [8] это показано для разряда длительностью 150 – 900 мкс. Данное положение существует и в разряде с короткой длительностью. Согласно работе [36], начальное давление ксенона для получения максимального КПД УФ-излучения имеет наибольшее значение для ламп меньших диаметров (рисунок 1.4.) и снижается с ростом диаметра.

Таким образом, из данного раздела следует сделать вывод о существовании оптимума зависимости между давлением ксенона и диаметром плазменного канала  $d$ . Причем согласно уравнению (1.8), чем меньше  $d$ , тем выше яркостная температура и, следовательно, появляется возможность увеличения выхода УФ-излучения.

### 1.2.3. Факторы, определяющие пусковые характеристики импульсных ксеноновых ламп.

Диапазон рабочего напряжения, параметры управляющего импульса (пиковое напряжение, мощность, форма и др.) и время запаздывания вспышки (или разрядного тока) относительно импульса зажигания зависят в общем случае от тех же конструктивных параметров ламп (размеров разрядного промежутка, состава и давления наполняющего газа), от которых зависят их излучательные характеристики и долговечность. Следовательно, пусковые параметры импульсных ламп, по существу, predeterminedены заранее, при разработке. Поэтому задача нормирования параметров управляемости ламп сводится к их оптимизации по отношению к эксплуатационным условиям (схеме включения или зажигания, частоте вспышек, виду охлаждения, распределению внешних электрических полей и т.п.).

Для уменьшения напряжения импульса зажигания в схемах последовательного поджига широко используется «пассивный» внешний электрод, представляющий собой тонкую проволоку, навитую на разрядную часть лампы и соединенную с заземленным электродом. Для маломощных светосигнальных импульсных ламп минимальное напряжение импульса зажигания равно 4 кВ при энергии в импульсе 3 мДж, для аналогичных ламп средней мощности – 10 кВ при 20 мДж, для ламп накачки и других мощных ламп – 20 кВ при 120 мДж. По данным [8], например, импульсные лампы накачки в зависимости от размеров разрядного промежутка зажигаются импульсом с пиковым напряжением 16, 18, 20, 25 кВ при длительности 0,2 – 10 мкс (энергия импульса не нормируется, а задается конструктивными параметрами типового зажигающего устройства).

Напряжение между основными электродами, в пределах которого возможно управляемое зажигание ламп, ограничивается напряжениями зажигания и самопробоя. Нижняя граница управляемости ламп характеризуется зависимостью напряжения зажигания от мощности вспомогательного разряда или, при определенном импульсном трансформаторе, от пикового напряжения импульса зажигания [41]. В связи со значительным разбросом напряжений зажигания и самопробоя для разных образцов ламп одного типа или при различных внешних условиях вероятность управляемого пробоя невысока (0,5 – 0,9). Поэтому устанавливается более узкий диапазон напряжений питания ламп, ограничиваемый наименьшим ( $U_{min}$ ) и наибольшим ( $U_{max}$ ) допустимыми напряжениями, в пределах которых обеспечивается надежное (с вероятностью не менее 0,99) зажигание разряда, не зависящее от внешних условий.

Максимальное рабочее напряжение устанавливается исходя из требований формирования импульса разрядного тока заданной формы и параметров [8], выбранной схемы включения лампы и частотно-мощностного режима, ограничиваемого деионизационной способностью лампы. Включение последовательно с лампой коммутирующего элемента (разрядника или тиристора) позволяет эксплуатировать лампу при напряжениях, равных напряжению самопробоя или превышающих его. Во всех других случаях должно быть обеспечено определенное сниже-

ние напряжения на лампе относительно напряжения самопробоя, исключающее возможность возникновения самопроизвольных разрядов. Для большинства типов импульсных ламп  $U_{max} \approx (0,5 - 0,75) U_{cn}$ , где  $U_{cn}$  – напряжение самопробоя.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что развитие импульсных ламп идет по двум направлениям: по пути расширения и оптимизации режимов и условий эксплуатации существующих источников излучения и по пути создания новых типов, если требуемые показатели не могут быть реализованы в рамках имеющихся конструкций.

В нашем случае проводимые нами исследования нацелены на решение второй задачи, так как создаваемая конструкция импульсного источника УФ-излучения должна заменить существующую газоразрядную лампу в серийно выпускаемой установке.

#### 1.2.4. Предельная энергия и долговечность.

Энергетические и эксплуатационные возможности импульсной газоразрядной лампы можно охарактеризовать предельной энергией вспышки (наименьшее значение подводимой к лампе электрической энергии, при которой с вероятностью, близкой к единице, происходит ее разрушение).

Предельная энергия конкретных типов серийных импульсных ламп мало чувствительна к отклонениям размеров элементов ламп и технологических режимов – наибольший разброс ее для образцов одного типа импульсных ламп обычно не превышает 15 – 20% [8]. Это обстоятельство и связь предельной энергии с долговечностью импульсных ламп делают указанный параметр важным при прогнозе ожидаемого срока службы газоразрядных ламп в режиме редких вспышек. Связь предельной энергии с долговечностью обусловлена, в частности, зависимостью этих характеристик от доли пристеночных потерь энергии [12, 49].

Причины разрушения импульсных ламп объясняются воздействием ударных волн [8, 43, 44], термическими напряжениями в оболочке [52 – 54], испарением материала оболочки [12, 34, 35, 55 – 58], ударным воздействием капель расплавленного материала электродов [12, 59]. Однако ни одна из моделей в отдель-

ности не объясняет всей совокупности имеющихся экспериментальных данных, что говорит о многообразии процессов, участвующих в разрушении.

Наиболее трудна теоретическая интерпретация сложных и неоднозначных экспериментальных зависимостей предельной энергии от толщины стенки оболочки и давления ксенона. Например, для ламп диаметром менее 10 мм зависимость предельной энергии от толщины стенки не обнаружена, а для ламп диаметром более 15 мм она проявляется отчетливо [8].

Трудности теоретического характера в известной мере стимулировали экспериментальные исследования. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал о нагрузочных характеристиках импульсных ламп найдено важное эмпирическое соотношение [60]:

$$W_{np} \approx 3250St^{\frac{1}{2}}$$

где  $W_{np}$  – предельная энергия;  $S$  – площадь внутренней поверхности разрядного промежутка лампы;  $t$  – длительность вспышки, определяемая на уровне 0,35 от максимума импульса тока. Формула позволяет с приемлемой для практики погрешностью (20 – 25%) оценивать предельные режимы трубчатых ксеноновых ламп различных длин и диаметров ( $S=\pi dl$ ) в диапазоне длительностей разряда 300-3000 мкс (для диаметров (0,4 – 2 см). Для малогабаритных ламп ( $d$  в диапазоне 0,4 ÷ 1,2 см) соотношение справедливо до значений длительностей 50100 мкс [60].

Износ элементов конструкции импульсных ламп (электродов, оболочки, вводов) сопровождается изменением характеристик излучения и электрических параметров, а также внезапным разрушением оболочки или потерей управляемости лампы. Минимальная долговечность, определяемая количеством вспышек  $N$  при энергии разряда  $W$  до разрушения оболочки, в режиме одиночных импульсов в зависимости от энергии разряда может быть оценена по эмпирической формуле:

$$N \approx \exp \left[ a \cdot \left( 1 - \frac{W}{W_{np}} \right) \right],$$

где  $a$  – постоянный множитель. Эта формула удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные результаты [8, 61, 62] при факторе нагрузки  $0,7 \geq W/W_{np} \geq 0,4$  и длительности разрядного тока  $10^{-4} - 10^{-2}$  с. При более коротких импульсах и меньших нагрузках, а также в режиме периодических импульсов зависимость долговечности от параметров разряда более сложна.

Снижение потока излучения импульсных ламп обусловлено тем, что на внутренней поверхности оболочки постепенно осаждаются продукты распыления электродного материала и образуется плотный налет. Наличие налета способствует росту энергии, выделяемой на стенке лампы, и, соответственно, повышению температуры поверхностного слоя, что приводит к накоплению внутренних напряжений в стекле и росту микродефектов на поверхности, которые могут вызвать разрушение трубки [47, 58, 59].

Другим важным фактором процесса старения является эрозия материала оболочки под действием температуры плазмы разряда. Испаряемый материал осаждается на холодных участках внутренней поверхности трубки в виде белого налета, интенсивность образования которого растет по мере увеличения энергии разряда. Поток излучения при этом снижается слабо, но периодическое воздействие на трубку неравномерно распределенных по ее поверхности термоударов приводит к появлению термических напряжений и, как следствие, к образованию трещин.

При работе лампы в режиме периодических импульсов с высокой удельной нагрузкой ( $150 - 250$  Вт/см<sup>2</sup>) и интенсивным принудительным охлаждением на внутренней поверхности трубки образуется светлый желто-коричневый налет – продукт диссоциации кремнезема, возникающий в результате взаимодействия плазмы разряда с кварцем [63]. Этот налет также снижает прочность оболочки и светоотдачу лампы.

Долговечность импульсных ламп существенным образом зависит от параметров импульса разрядного тока. При прочих равных условиях (энергии и длительности разряда, средней мощности и др.) наибольшая долговечность может быть получена при аperiodическом разряде с формой импульса тока, максималь-

но приближающейся к полусинусоиде. Например, при одинаковой энергии разряда долговечность лампы ИФП-800 снижается почти вдвое, если амплитуда тока второго полупериода составляет 30 – 40% от амплитуды первого.

На долговечность ламп влияет и способ зажигания разряда [64, 65]. Так, в схеме с дежурной дугой долговечность ламп в режиме периодических импульсов увеличивается почти в 5 раз по сравнению с долговечностью ламп с импульсным зажиганием (с внешним электродом). Долговечность в схеме с последовательным зажиганием примерно в 1,5 – 2,5 раза больше, чем с внешним. Схема с дежурной дугой позволяет также значительно снизить рабочее напряжение питания лампы, что существенно облегчает формирование импульса тока с оптимальными по отношению к долговечности параметрами.

Работы по дальнейшей миниатюризации импульсных ламп, осуществляемой на основе применения компактных вакуумных вводов в кварцевое стекло, существенному расширению частотного диапазона (до сотен герц), повышению спектральной эффективности источников излучения, увеличению их долговечности и стабильности параметров в течение срока службы открывают большие перспективы для их широкого промышленного использования.

### 1.3. Анализ существующих конструктивных вариантов импульсной ксеноновой лампы с кварцевой оболочкой.

Конструктивные исполнения разрядного объема практически идентичны для всех вариантов импульсных источников излучения и представляют собой кварцевую оболочку определенной конфигурации с герметично установленными на ее краях электродными узлами и заполненную инертным газом, например, ксеноном. Отличие всех существующих в мире газоразрядных ламп связано с конструкцией токоввода (электродного узла). В данном разделе обобщаются материалы патентов и научной литературы, посвященные способам герметизации разрядного объема лампы, анализируются наиболее часто встречающиеся конструкции токовводов с точки зрения их преимуществ и недостатков, технологичности и трудоемкости изготовления, специфики применения в том или ином случае. Це-

лью проводимого анализа является определение базовой конструкции токоввода, обеспечивающего возможность прохождения импульсов токов с пиковым значением до нескольких килоампер в режиме редких вспышек.

**Газоразрядные лампы с токовводом на основе переходных стекол** [17, 66 – 71]. За рубежом широкое распространение получили токовводы с применением переходных стекол, которые хорошо спаиваются между собой и позволяют создавать герметичные спаи с тугоплавкими металлами (молибден, вольфрам) [17, 66, 68]. Газоразрядные лампы со спаем на переходном стекле (рисунок 1.5) используют технологию, которая позволяет обеспечить герметичное соединение между вольфрамовым держателем 6 электрода 2 и кварцевой оболочкой 1 лампы.

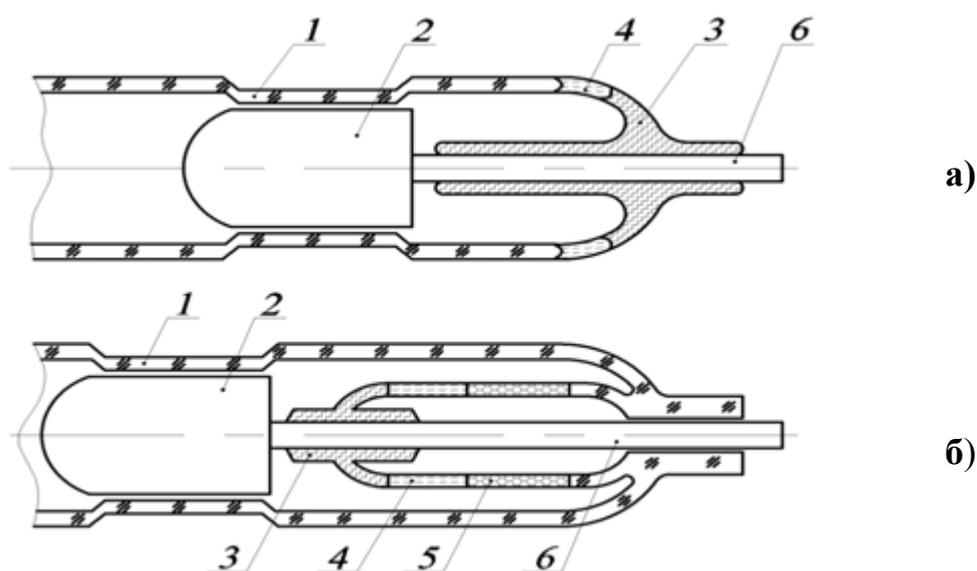


Рисунок 1.5. Токоввод в газоразрядную лампу на основе переходных стекол с прямым (а) и обратным (б) спаем [17, 66, 68, 71]:

1 – кварцевая оболочка, 2 – электрод, 3, 4, 5 – слои переходных стекол, 6 – вольфрамовый стержневой токоподвод.

Электрод 2 лампы закрепляется пайкой или сваркой на тонком вольфрамовом стержне 6 диаметром менее 4 мм. Спаи между вольфрамовым стержнем и кварцевой оболочкой лампы осуществляется с помощью одного или нескольких стекол (рисунок 1.5, поз 3 – 5) с промежуточными коэффициентами расширения.

Для получения надежного спая двух соседних стекол важна не только близость их КЛТР, но также и температура размягчения. Хорошее проплавление контакта стекол возможно только в случае правильного подбора температур размягчения и, определяющим фактором является мастерство стеклодува.

Токовводы указанного типа применяются двух конфигураций: с прямым (рисунок 1.5, а) и обратным спаем (рисунок 1.5, б). Наибольшее распространение в зарубежном производстве газоразрядных ламп получил вариант обратного спая. Конструкция импульсной лампы с обратным переходным спаем способна выдерживать разряд с энергией вблизи или выше теоретической величины, при которой происходит разрушение оболочки. Это объясняется тем, что волна сжатия внутри лампы, вызываемая разрядом, как бы сжимает переходный спай. В лампе с прямым спаем действие ударной волны ведет к расширению спая на переходном стекле. Преимущества и недостатки конструкции импульсной лампы с токовводами на основе переходных стекол приведены в таблице 1.2.

**Газоразрядные лампы с фольговым спаем** [17, 66, 67, 71 – 76]. Данная конструкция токоввода наиболее распространена в российском ламповом производстве и представляет две разновидности соединений с кварцем, а именно, ленточный (рисунок 1.6, а) и цилиндрический (рисунок 1.6, б) спаи.

Кварцевое стекло при изготовлении спая нагревается до температуры размягчения и хорошо смачивает молибденовую фольгу. После охлаждения спая напряжения, вызванные разностью коэффициентов линейного термического расширения, оказываются меньше сил сцепления между стеклом и металлом. Напряжения, возникающие вдоль поверхности фольги, частично компенсируются за счет ее пластической деформации.

Ленточный спай позволяет обеспечить соединение между полоской молибденовой фольги 2 и кварцевой трубкой 3 при использовании высокотемпературного вакуумного обжата. Одно из преимуществ ленточного спая заключается в его прочности, обеспечиваемой тем, что вокруг молибденовой полоски, соединенной с электродом лампы, оказывается толстый слой кварца 3.

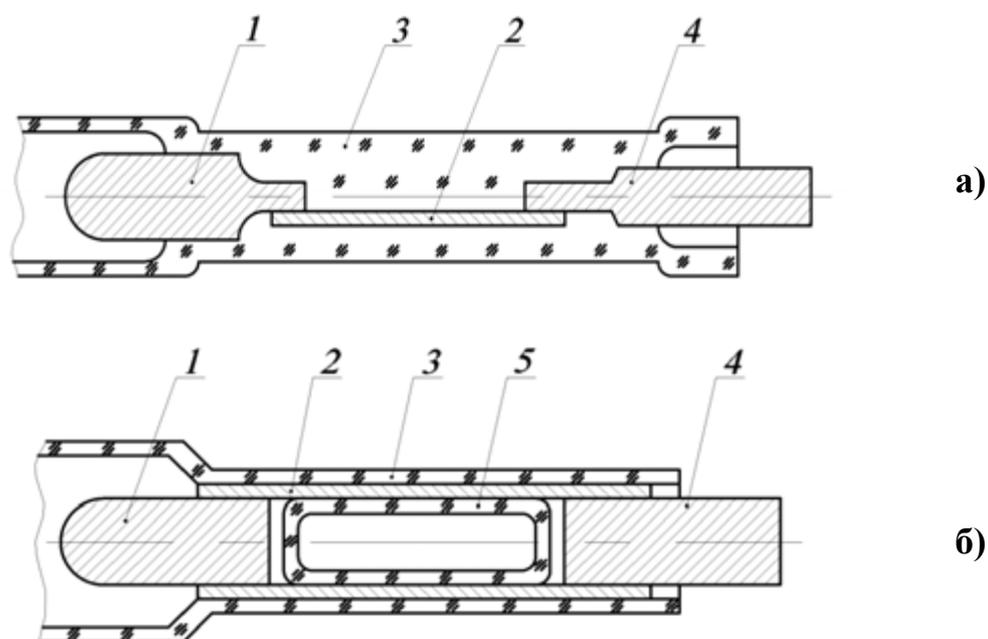


Рисунок 1.6. Токоввод в газоразрядную лампу на основе плоской (а) и цилиндрической (б) молибденовой фольги [17, 66, 67, 71, 75]:

1 – электрод, 2 – молибденовая фольга, 3 – кварцевая оболочка, 4 – металлический токоподвод, 5 – кварцевый вкладыш.

Подобно гермовводам на переходном стекле, этот спай в процессе производства позволяет выполнять высокотемпературную обработку в высоком вакууме. Ещё одно преимущество ленточного спая состоит в том, что он избавляет от балластных объемов, т.е. участков за пределами области разряда, в которых во время работы лампы накапливается холодный неионизованный газ.

Сложность изготовления ленточного спая заключается в том, что соединение массивных электродов с фольгой затруднительно. Исключить данный недостаток позволяет цилиндрический спай, конструкция которого показана на рисунке 1.6, б. Представленная модификация электродного узла представляет собой незамкнутый цилиндр 2 из свернутой молибденовой фольги толщиной 50 – 70 мкм. Кромки этого цилиндра по образующей стравливаются в электролитической ванне до толщины 8 – 10 мкм. Внутри цилиндра размещается кварцевый вкладыш 5, заполненный воздухом до фиксированного давления, и привариваются электрод 1 и токоподвод 4. Дальнейшая заварка осуществляется в вакууме по аналогии с

ленточным спаем. Преимущества и недостатки конструкции импульсной лампы с токовводами на основе переходных стекол приведены в таблице 1.2.

**Газоразрядные лампы с колпачковым спаем** [17, 59, 60, 64, 70 – 73]. В случае, когда импульсная лампа эксплуатируется в режимах редких вспышек, а рассеиваемая в ней средняя мощность и температура ввода незначительны, целесообразно применять колпачковые вводы. При изготовлении соединения кварцевого стекла с металлом посредством пайки металлическими припоями сталкиваются с двумя трудностями: появлением высоких напряжений в спае из-за различий в КЛТР кварцевого стекла и металлов, а также низкой смачиваемостью кварца большинством припоев. Эта проблема решается подбором легкоплавких мягких припоев, компенсирующих напряжения в спаях за счет пластической деформации, введением в припой активных элементов, взаимодействующих со стеклом, предварительной металлизацией кварцевого стекла, а также соответствующим оформлением спаев.

В основе изготовления ламп с колпачковым (паяным) спаем лежит технология, в соответствии с которой спай осуществляется между кольцевой полоской из инвара 4 (колпачок) и кварцевой трубкой 3 (рисунок 1.7).

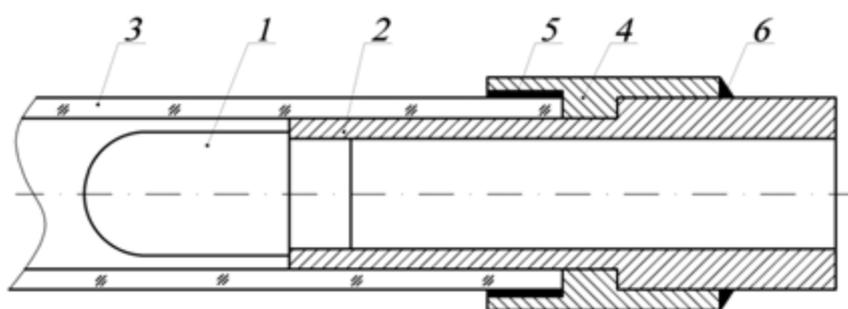


Рисунок 1.7. Токоввод в газоразрядную лампу на основе паяного металлического колпачка [66]:

1 – электрод, 2 – металлический токоподвод, 3 – кварцевая оболочка, 4 – металлический колпачок, 5 – легкоплавкий припой, 6 – зона лазерной сварки.

Спай колпачка 4 с кварцевой оболочкой 3 выполняется на свинцово-индиевом припое 5 с точкой плавления менее 300 °С. В данной конструкции электрод 1 соединяется держателем 2 пайкой медью, а герметизация лампы осуществляется сваркой в зоне 6. Преимущества и недостатки конструкции импульсной лампы с колпачковыми токовводами приведены в таблице 1.2.

Сопоставление вариантов конструктивного исполнения представленных на рисунках 1.5 – 1.7 токовводов, анализ их преимуществ и недостатков позволяет сделать вывод, что перспективным направлением создания импульсного высокоинтенсивного источника УФ-излучения, работающего в режиме редких вспышек, представляется импульсная ксеноновая лампа на базе колпачково-стержневого ввода (рисунок 1.7). При таком решении характеристики импульсных ламп не зависят от конструкции токоввода и электрическая энергия, вкладываемая в разряд, определяется предельной нагрузкой  $P_{пред.}$  на кварцевую оболочку, ограничивающую плазменный канал. В свою очередь,  $P_{пред.}$  зависит от формы и длительности импульса тока, физических свойств материала стенок и конструктивных параметров лампы. По этой причине представляется необходимым, провести обобщающий анализ раздела 1.2 применительно к импульсной ксеноновой лампе с учетом особенностей выбранной конструкции токоввода.

#### 1.4. Обобщение факторов, определяющих характеристики УФ-излучения импульсного ксенонового разряда, и постановка задач исследования.

Как отмечалось в разделе 1.2.1 для увеличения эффективности импульсного разряда в УФ области необходимо увеличить яркость излучения ксеноновой плазмы. Такое техническое решение требует увеличения электрической мощности, вкладываемой в разряд, причем за очень короткий промежуток времени (20 – 150 мкс [8, 14, 81]). В результате такого воздействия мгновенные токовые нагрузки на ввод энергии в разрядный объем достигают величин нескольких килоампер [77].

Таблица 1.2.

Преимущества и недостатки конструкций токовводов в разрядный объем импульсных ламп.

Газоразрядные лампы с фольговыми токовводами	Газоразрядные лампы с токовводами на переходных стеклах	Газоразрядные лампы с колпачковыми токовводами
<b>Недостатки</b>		
1. Энергия импульса единичной вспышки ограничена разрушением фольги из-за тонкого поперечного сечения [66]. Одиночный ленточный ввод пропускает ток до 15 А, а цилиндрический не более 300 А [17].	1. Использование дефицитных переходных стекол с точными коэффициентами температурного расширения и обеспечивающими хорошую спаиваемость с другими материалами [17, 68, 70, 71].	1. Недостаточная вакуумная плотность, связанная с трудностью воспроизводимости спаев. [77].
2. Фольговый ввод имеет увеличенную длину, низкую коррозионную стойкость к длительному воздействию влаги и температуры окружающей среды [17,20, 67].	2. Спаи с кварцем имеют низкую механическую прочность, малую рабочую температуру (до 500 °С), значительные заэлектродные объемы [17, 20].	2. Незначительные рабочие температуры (до 200°С) спаев, ограничивающие диапазон эксплуатации газоразрядной лампы [17, 67].
3. Высокая трудоемкость, технология состоит из большого числа ручных операций, выполняемых высококвалифицированными кварцедувами, отсутствие возможности механизации производства [17, 67, 71].	3. Сложность технологии, связанная с значительным количеством (до пяти) переходов, невозможность контроля и снятия напряжений каждого спая, возможность разрушения токовводов в процессе хранения ламп [17, 66, 67].	3. Невозможность высокотемпературного обезгаживания разрядного объема [17, 71].
<b>Преимущества</b>		
1. Высокая вакуумная плотность соединения. [17, 67, 71].	1. Использование стержневого ввода позволяет достигать высоких токов [17, 20, 67, 71].	1. Предельная энергия вспышки лампы определяется стойкостью оболочки. [77,79,80].
2. Высокая термостойкость спая [75]	2. Высокая термостойкость спая [17].	2. Отсутствие ограничений по токовой нагрузке[17, 20, 77, 80].
3. Механическая и диэлектрическая прочность ввода [75]	3. Высокая технологичность за счет механизации производства [17].	3. Высокая механическая прочность [17, 71, 77, 79, 80].
-	-	4. Компактность токоввода, не требующая цоколевки [20].
-	-	5. Высокая технологичность за счет механизации производства [17, 78].

На сегодняшний день распространенные в России технические решения фольговых токовводов в разрядный объем (см. раздел 1.3.) не способны обеспечить надежность серийных импульсных газоразрядных ламп, работающих в режимах редких вспышек с такими параметрами токов. Решить данную проблему может только разработка газоразрядной лампы с колпачковым токовводом. Правильность сделанного заключения подтверждается результатами работы [77], в которой успешно проведены испытания макетных образцов импульсных ламп типа ИФП-400 (диаметр разрядного канала  $d=5$  мм и межэлектродное расстояние  $l=40$  мм) и ИФП-1000-2 ( $d=7$  мм и  $l=80$  мм) с колпачковыми вводами. Испытания импульсных ксеноновых ламп позволили достичь предельную энергию  $W_{np.}=600$  Дж (ИФП-400) и  $W_{np.} = 1500$  Дж (ИФП-1000-2), превышающую расчетные величины пределов разрушения  $W_{np. расч.} = 450$  Дж (ИФП-400) и  $W_{np. расч.} = 1250$  Дж (ИФП-1000-2). При этом, как следует из этой работы, достигнутые значения предельной энергии разряда в 2 раза превышают  $W_{np}$  ламп с фольговым токовводом.

Следовательно, перспективность данного технического решения не только имеет теоретические предпосылки, но и подтверждена экспериментально. В то же время, как следует из сопоставления рисунков 1.6 и 1.7 от сферической рабочей поверхности электрода до места герметизации токоввода из-за конструкторских и технологических особенностей электродного узла формируется полость (заэлектродный, балластный объем  $V_{\delta}$ ), величина объема которой в случае колпачкового ввода может в несколько раз превышать  $V_{\delta}$  для фольгового ввода. Такое положение неизбежно приведет к изменению давления плазмообразующей среды.

Выполним оценку снижения давления в рабочей части лампы.

Пусть  $N$  – плотность газа в холодной лампе, а  $T_p$  и  $T_{\delta}$  – средняя по сечению температура газа ( $K$ ) в разрядной части и балластном объеме работающей лампы соответственно. Тогда, исходя из условия равенства давления газа в балластном объеме и в разрядной части  $N_p$  будем иметь:

$$N_p/N=(1+V_{\delta}/V_p)(1+T_p V_{\delta}/T_{\delta} V_p)^{-1}$$

Далее, учитывая, что  $N=np$  (где  $p$  в атм.,  $n$ -плотность газа при  $T=300$  К и давлении  $p=1$  атм.), и полагая  $N_p=\text{const}$  (условие постоянства напряжения на лампе), получаем:

$$p/p_0=(1+T_p V_0/T_0 V_p)(1+V_0/V_p)^{-1} \quad (1.10)$$

Величину  $T_p$  можно найти по известному распределению температуры по сечению разряда, а  $T_0$  – из решения уравнения теплопроводности для цилиндра с заданными граничными условиями, если известны температура электродов и температура внутренней стенки разрядной трубки.

Из уравнения (1.10) следует что, чем выше температура разряда (что важно для достижения высокой эффективности излучения ксенонового разряда в УФ области) и величина балластного объема, тем меньше давление разряда в межэлектродном пространстве. Данный эффект неизбежно повлечет за собой изменение целого ряда характеристик разряда и потребует корректировки конструкции газоразрядной лампы и согласования разрядного контура (рисунок 1.8,б).

Второй особенностью разрабатываемой импульсной ксеноновой лампы является наличие U-образной конфигурации разрядного объема (рисунок 1.8,а). Суть проблемы заключается в том, что наличие двух параллельных каналов обеспечивает воздействие на плазму собственного излучения. Данная проблема частично теоретически изучена для импульсного разряда в ксеноне в работах [82 – 84] и сделана экспериментальная попытка определить влияние на плазму щелочных металлов в работе [85].

На основании анализа перечисленных работ можно сделать следующие заключения:

1. Собственное излучение, попадая обратно в разряд, частично поглощается в плазме в такой степени, которая определяется оптической плотностью среды. Оптическая плотность разрядов зависит от спектрального распределения коэффициента поглощения  $k_\nu$  и геометрическими размерами столба плазмы (радиуса  $R$ ).

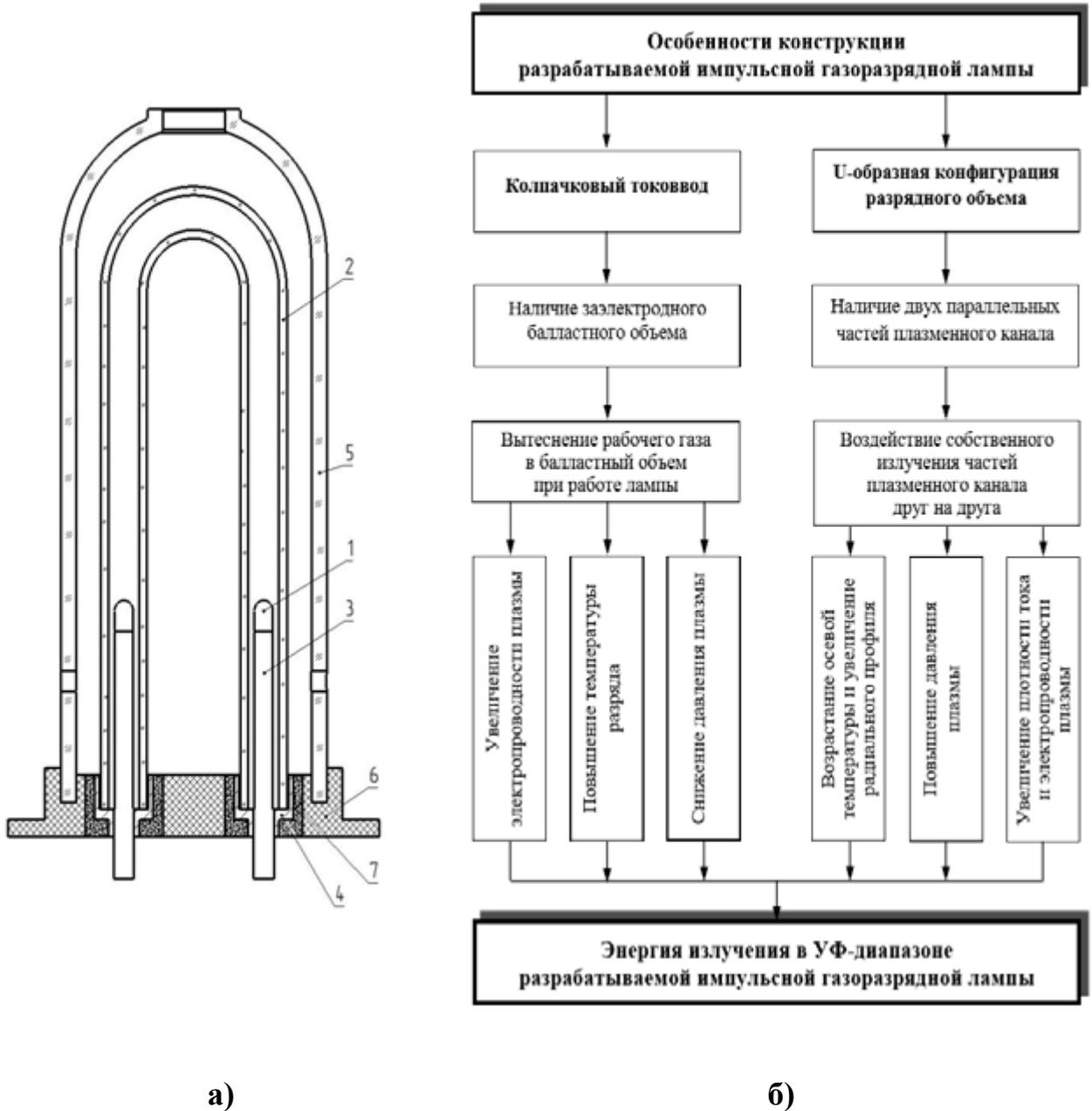


Рисунок 1.8 Устройство разрабатываемой импульсной лампы (а) и блок-схема (б) влияния конструктивных параметров на характеристики плазмы и энергию УФ-излучения

1 – электрод, 2 – разрядная трубка, 3 – держатель электрода, 4 – колпачок, 5 – внешняя колба, 6 – цоколь, 7 – герметик.

С увеличением температуры коэффициент поглощения резко возрастает: при изменении температуры на 25 % (с 8000 до 10000 К) значения  $k_\nu$  возрастают на отдельных участках спектра почти на 2 порядка [82]. При этом меняются как его непрерывный, так и оптически более плотный линейчатый компоненты. В области 250 – 510 нм среднее по спектру значение оптической плотности  $W$  при  $T = 10^4$  К находится на уровне 0,08, а при  $T = 1,2 \cdot 10^4$  К – на уровне 0,3, т. е. с увеличением мощности разряда и, соответственно, температуры плазмы эффект нагрева плазмы собственным излучением будет нарастать.

2. Поглощенное излучение нагревает разряд, способствуя изменению температурных полей в нем и в среднем повышению его температуры, при этом меняются электрические свойства плазменного столба, давление плазмы, спектральное распределение излучения [83, 84]. В инфракрасной области спектра значение  $k_\nu$  выше, и здесь возврат излучения в плазму даст эффект подогрева при меньших коэффициентах отражения.

3. Эффект нагрева плазмы вносит заметный вклад в состояние разряда, так как состав (концентрации частиц) и все материальные функции (коэффициенты тепло- и электропроводности, оптический коэффициент поглощения) плазмы резко зависят от температуры. С увеличением средней температуры уменьшается омическое сопротивление разряда, меняются тепловые потоки на стенку, сокращается длительность импульса тока. Для сохранения указанной длительности неизменной необходимо оптимизировать параметры разрядного контура, такие как емкость, индуктивность, напряжение на конденсаторе. Затягивание температурного импульса приводит к изменению длительности свечения в различных спектральных интервалах. Вместе с температурой примерно так же возрастает и давление в разряде [82 – 84].

На основе научного анализа результатов исследований, зарубежных авторов А.М. Ховатсона [21], В. Финкельнбурга, Г. Меккера [22], Л.И. Леба [23] И.С. Маршака [8], Я.Б. Зельдовича [24], Ю.П. Райзера [24, 25], Ю.Г. Басова [14], О.А. Малкина [26], Г.А. Месяца [27], а также материала, изложенного в разделах 1.2.1 – 1.2.3, можно сформулировать цели и задачи диссертационного исследования.

Таким образом, для достижения поставленной цели, а именно, разработки импульсного ксенонового газоразрядного источника ультрафиолетового излучения с U-образной конфигурацией плазменного канала, обеспечивающего максимальные выходные параметры излучения ОЭС в спектральном диапазоне 200 – 300 нм, необходимо провести исследования по следующим направлениям:

1. Доработать существующую математическую модель импульсного ксенонового разряда в части учета влияния заэлектродного объема и выполнить расчетные исследования.

2. Разработать методики исследований и создать комплекс испытательного оборудования для изучения характеристик импульсных источников УФ-излучения.

3. Экспериментально выявить влияние размеров балластного объема, воздействия излучения двух параллельных плазменных каналов U-образной конфигурации на электрические параметры и характеристики излучения импульсного ксенонового разряда.

4. Провести конструкторские и технологические исследования электродных узлов в части оптимизации температурного состояния катода и анода, а также способов соединения тоководов с кварцевой оболочкой.

5. Изучить основные эксплуатационные характеристики разработанной лампы, а именно, пространственное распределение излучения в УФ и ИК областях спектра, время готовности импульсного газоразрядного источника и т.д.

## ГЛАВА 2. РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ЛАМП

Исследованию импульсного ксенонового разряда посвящено значительное число экспериментальных [10 – 11, 32 – 41, 45 – 53], теоретических [8, 14, 22 – 27, 54, 56] и расчетных [29 – 31, 57, 58, 86 – 88] научных работ. В то же время, как отмечалось в главе 1, придание плазменному каналу U-образной конфигурации и использования колпачково-стержневого ввода ставит задачу проведения дополнительных исследований, направленных на получение новых знаний свойств газового разряда, определяющих выход излучения в УФ области спектра в условиях предложенного конструктивного решения. В данной главе поставленная задача решается в два этапа – сначала посредством математического моделирования анализируются влияние указанных конструктивных особенностей на свойства ксеноновой плазмы, а затем проводится экспериментальная проверка полученных зависимостей и заключений.

### 2.1. Математическое моделирование и расчетные исследования характеристик импульсного ксенонового разряда

В последнее время математическое моделирование завоевывает большую популярность в различных отраслях науки и техники. Широкое распространение этого эффективного средства научного исследования обусловлено исключительной информативностью данных, которые могут быть получены при хорошо подготовленном и организованном численном эксперименте [86 – 88]. Поэтому для определения влияния балластных объемов газоразрядной лампы на характеристики ксеноновой плазмы воспользуемся методом математического моделирования.

В исследуемой ксеноновой плазме формируется мощное радиационное поле, кондуктивные и конвективные потоки тепла, происходит перенос излучения с самопоглощением в условиях оптической полупрозрачности среды с частичным возвратом лучистой энергии в плазму после отражения от кварцевых оболочек [29, 57, 82, 86 – 88]. Многообразие перечисленных взаимосвязанных теплофизи-

ческих процессов делает практически невозможной глубокую оптимизацию параметров и условий работы импульсной лампы, а также прогнозирования ее поведения в экстремальных режимах. [8, 12, 57, 89].

### 2.1.1 Основные требования к математическим моделям разрядов импульсных газоразрядных источников излучения

Основными требованиями к газоразрядному источнику являются: большой энергетический выход излучения в требуемых спектральных диапазонах; минимальный выход излучения в нерабочей области длин волн, например в области поглощения материала оболочки; достаточный запас прочности, связанный с предельной энергией разрушения лампы  $W_{пр}$ , высокий уровень долговечности [10, 58, 62, 89]. Перечисленные выше требования применительно к импульсным газоразрядным источникам излучения являются в значительной степени противоречивыми.

В свете изложенных выше особенностей теоретическая модель разряда импульсного источника излучения должна обеспечивать с достаточной для практики точностью расчет спектральных и энергетических параметров, энергетических нагрузок на оболочку, электрофизических характеристик разряда в широкой области удельных электрических мощностей ( $\langle W \rangle \sim 10 - 10^4$  кВт/см<sup>3</sup>) [8, 57 – 59] источников. При этом в указанных диапазонах электрических мощностей оптическая плотность плазмы меняется на несколько порядков, характер заполнения разрядной колбы оказывается разным в зависимости от рода газа и давления наполнения. В случае импульсных источников излучения имеют место режимы, в которых наблюдается испарение материала оболочки [57 – 59] с последующим поступлением продуктов испарения в разряд. В течение разряда происходит вытеснение газа в холодные заэлектродные области [8, 89 – 91]. Отмеченные явления изменяют характеристики источника накачки и должны учитываться в модели разряда импульсного источника излучения.

Комплекс физико-химических процессов, протекающих в оболочке и электродах газоразрядной лампы, оказывает решающее влияние на ее работоспособность и долговечность. Кроме этого, температурное состояние оболочки, элект-

тродных узлов и заэлектродных областей, процессы эрозии оболочки (в жестких режимах) с последующим поступлением продуктов эрозии в разряд тесно взаимосвязаны с процессами, протекающими в самом разряде. Это вызывает необходимость решения самосогласованной задачи по расчету процессов, протекающих как в разряде, так и в элементах конструкции импульсной лампы.

### 2.1.2 Математическая модель нестационарного разряда в инертных газах и алгоритм ее реализации

Разработка математической модели импульсного ксенонового разряда является сложной многолетней работой, требующей формирования огромной базы данных материальных функций и оптических характеристик плазмы. По этой причине в наших расчетных исследованиях за основу взята разработанная профессором Градовым В.М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) математическая модель, алгоритм реализации которой и информационное обеспечение подробно рассмотрено в его работах [27, 86 – 88]. В данном разделе приводиться только обобщенное описание сформированной Градовым В.М. системы уравнений импульсного разряда, ограниченного кварцевой оболочкой. В соответствии с выполненными в работах [27] численными оценками характерных времен достижения квазистационарного состояния и размеров плазменных объемов математическая модель импульсного ксенонового разряда базируется на следующих допущениях:

- разряд имеет цилиндрическую симметрию;
- плазма разряда находится в состоянии локального термодинамического равновесия;
- давление в плазме и напряженность электрического поля постоянны по сечению и длине разрядного промежутка.

Используемая математическая модель формулируется в достаточно общем виде и в различных модификациях используется в расчетах импульсных, стационарных и квазистационарных режимов с учетом температурного состояния стабилизирующих разряд оболочек [27, 57, 86 – 88, 92 – 94]:

$$C_p \rho \frac{dT}{dt} + C_p \rho \cdot V \frac{dT}{dr} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda(T, p) \frac{dT}{dr} \right) + \sigma(T, p) E^2 - \operatorname{div} F. + \frac{dp}{dt}, \quad (2.1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rV\rho) = 0, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div} F. = c \int_0^\infty k_\lambda(T, p, \lambda) [U_{\lambda p}(T) - U_\lambda] d\lambda, \quad (2.3)$$

$$F_\lambda = -\frac{1}{3k_\lambda} \frac{dU_\lambda}{dr}, \quad (2.4)$$

$$\operatorname{div} F_\lambda = c k_\lambda (U_{\lambda p}(T) - U_\lambda) \quad (2.5)$$

$$\frac{p^0}{kT^0} = \frac{2}{R^2} \int_0^R n_T(r, p) r dr, \quad (2.6)$$

$$R_p = \frac{L}{2\pi \cdot \int_0^R \sigma(T, p) r dr}, \quad (2.7)$$

$$E = IR_p / L, \quad (2.8)$$

$$L_k \frac{dI}{dt} + (R_k + R_p) I - U_c = 0, \quad (2.9)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{1}{C_k} I. \quad (2.10)$$

Представленная система включает уравнения сохранения энергии (2.1), неразрывности (2.2), переноса излучения (2.3) – (2.5), сохранения массы в замкнутом объеме (2.6), закона Ома (2.7), (2.8), уравнения внешней электрической цепи (2.9), (2.10)

В предложенной системе уравнений использованы следующие обозначения:  $T$  – температура плазмы, единая для легких и тяжелых частиц;  $\sigma, \lambda, k_\lambda$  – коэффициенты электро- и теплопроводности и оптического поглощения плазмы с учетом вынужденного испускания;  $C_p, \rho, P$  – теплоемкость, плотность и рабочее давление в разряде;  $R$  – радиус разрядного канала;  $c$  – скорость света;  $E, F$  – напряженность электрического поля и плотность интегрального по спектру потока излучения в точке с текущей радиальной координатой;  $F_\lambda$  – плотность спектрального потока излучения;  $U_{\lambda p}, U_\lambda$  – равновесная объемная плотность энергии излучения и объемная плотность энергии излучения, устанавливающаяся в плазме;  $p^0, T^0$  – начальное давление наполнения и температура плазмообразующей среды;  $n_T$  – радиальное распределение тяжелых частиц в разряде;  $R_p, L_k, R_k, U_c, I, C_k$  – электрическое сопротивление плазмы, индуктивность и сопротивление разрядного контура, напряжение на конденсаторе, электрический ток и емкость конденсатора.

Дополнительные соотношения к выписанной системе уравнений формулируются в следующем виде:

$$t = 0, T(0, r) = T_0(r); U_c = U_0; I = I_0; \quad (2.11)$$

$$r = 0, \frac{dT}{dr} = 0; r = R, T = T_w \quad (2.12)$$

где  $T_0(r), U_0, I_0, T_w$  – начальное распределение температурного поля, начальные напряжения на конденсаторе электрический ток, температура на границе плазменного столба, соответственно.

Схема выполнения полного цикла математического моделирования разрядов, находящихся в состоянии локального термодинамического равновесия, выглядит следующим образом. На начальном этапе работы формируются массивы первичных данных, необходимых для расчета характеристик плазмы. К этим дан-

ным относятся квантово-механические параметры частиц (полная характеристика возможных состояний, энергия ионизации), характеристики радиационных процессов, сечения элементарных упругих и неупругих столкновений с участием электронов и тяжелых частиц.

Затем производится расчет статистических сумм с использованием различных методов обрезания рядов и компонентных составов плазмы. Следующий этап заключается в определении термодинамических и теплофизических свойств исследуемой плазмы (теплоемкости, плотности, энтальпии, коэффициентов тепло- и электропроводности) и коэффициента оптического поглощения. Для вычисления последнего проводится отбор учитываемых радиационных процессов, и последовательно рассчитываются параметры спектральных линий, коэффициент поглощения в дискретном спектре, составляющие непрерывного коэффициента поглощения и затем суммарный коэффициент поглощения плазмы. Подробно методика расчета коэффициента поглощения ксенонового разряда будет рассмотрена в главе 2. Найденные таким образом свойства плазмообразующей среды, включая результаты ряда промежуточных расчетов (например, оптических параметров или составов) заносятся в базу данных, откуда они извлекаются соответствующими программами при моделировании процессов в разряде.

Замкнутое моделирование исследуемой системы требует дополнительного привлечения информации о теплофизических и оптических свойствах материалов конструкции разрабатываемого газоразрядного источника излучения. В состав соответствующих данных включаются спектральные коэффициенты поглощения, преломления и рассеяния материалов оболочек при различных температурах, спектральные коэффициенты поглощения, преломления и отражения поверхностей с учетом их теплофизического состояния, температурные зависимости коэффициентов теплопроводности материалов, спектральные степени черноты поверхностей. Эти характеристики берутся из различных литературных и справочных источников. При этом некоторые данные для удобства хранения и последующего использования удобно аппроксимировать аналитическими зависимостями.

Например, коэффициент теплопроводности кварца  $\lambda$  в функции от температуры  $T$  можно представить в виде

$$\lambda(T) = \lambda_0 \left( \frac{T}{\theta} \right)^n,$$

где параметры  $\lambda_0, \theta, n$  подбираются обработкой таблицы эмпирической температурной зависимости коэффициента теплопроводности в логарифмических координатах.

### 2.1.3 Формирование модели с учетом движения газа в заэлектродные объемы импульсной газоразрядной лампы

Как отмечалось в главе 1, при работе импульсных источников излучения газ вытесняется в заэлектродные балластные объемы [90, 91]. Для учета этого явления обычно используется условие сохранения массы газа в замкнутом объеме разрядной трубки и делается допущение о постоянстве рабочего давления по всему объему [95 – 97].

При численных исследованиях характеристик дуговых газоразрядных источников излучения [97] средняя температура газа в заэлектродном объеме вычисляется на основе уравнения теплопроводности для кольцевого слоя газа, заключенного между электродом и оболочкой лампы. В этом случае стационарность разряда позволяет игнорировать процесс движения газа в заэлектродные зоны. Однако при моделировании импульсных разрядов в лампах учет нестационарности протекающих в них процессов требует рассмотрения явления заполнения балластных областей. Последовательно газодинамический подход к решению этой задачи приводит к определенным трудностям, так как приходится рассчитывать двумерные нестационарные течения. Если учесть, что интенсивные газодинамические явления возникают на стадии формирования разряда, которая при длительностях импульса  $10^{-4}$  с занимает относительно малую его часть [8], описание заполнения газом заэлектродных объемов можно провести в упрощенной постановке на основе приближенных модельных представлений.

В данном разделе нами на основе сравнения данных теории и эксперимента исследовалась работоспособность описанной в разделе 2.1.2 математической модели, доработанной нами с учетом влияния заэлектродных объемов.

Заполнение рабочим газом заэлектродных объемов в течение импульса тока рассматривалось в одномерном приближении. При этом предполагалось, что плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР), градиенты давления отсутствуют. Проведенные оценки характерных времен [98] показывают, что принятые допущения справедливы при длительностях импульса  $\tau > 10^{-4}$  с и размерах заэлектродных объемов  $V_s \leq (0,5 - 1) \cdot V_p$ , где  $V_p$  – объем рядного промежутка.

С учетом принятых допущений система уравнений, описывающая заполнение заэлектродных объемов, имеет вид:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(gv) = 0 \quad (2.14)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{dp}{dt} - \text{div} F_r + \frac{2\alpha}{R^2 - r_e^2} [(T - T_e)R + (T - T_e)r_e] \quad (2.15)$$

$$\text{div} F_r = c \int_0^{\infty} K_v (U_{\rho v} - U_v) dv \quad (2.16.)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{3K_v} \frac{dU_v}{dx} \right) - \left[ K_v + \frac{2}{3} \frac{1}{A_v (R^2 - r_e^2)} \frac{1 - \rho_v}{1 + \rho_v} (r_e + R) \right] U_v + K_v U_{\rho v} = 0 \quad (2.17)$$

где  $g$ ,  $p$ ,  $T$  – соответственно плотность, давление и температура плазмы;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $x$  – координата, отсчитываемая от торца электрода в направлении оси лампы;  $v$  – скорость движения;  $R$  – радиус оболочки;  $r_e$  – радиус электрода;  $K_v$  – усредненный по частоте в спектральном интервале коэффициент поглощения плазмы;  $\rho_v$  – спектральный коэффициент отражения излучения поверхностью электрода;  $U_v$  – спектральная плотность излучения;  $U_{\rho v}$  – равновесная спектральная плотность излучения;  $A_v$  – константа [98];  $T_c$ ,  $T_e$  – температура оболочки и электрода соответ-

ственно;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, определяемый из критериального уравнения [99].

Граничные и начальные условия:

- при  $x=0$   $T(0,t) = \langle T_n \rangle$

$$\frac{c}{3K_v} \frac{dU_v}{dx} = \langle F_v \rangle, K_v \cdot L \leq 5 \quad U_v = U_{pv}(\langle T_p \rangle), K_v L > 5$$

- при  $x=l$   $T(l,t) = T_3; V(l < t) = 0$   $U_v = \frac{A_v}{K_v} \frac{dU_v}{dx}$

- при  $t=0$   $T(x,0) = T_n(x); V(x,0) = 0$

где  $l$  – длина заэлектродной области,  $L$  – длина межэлектродного промежутка,  $T_3$  – температура в месте заварки электродного узла.

Температуры  $\langle T_n \rangle$  и  $\langle T_p \rangle$  определяются следующим образом:

$$\langle T_n \rangle = \frac{2}{R^2 - r_e^2} \int_{r_e}^R T_p(r) r dr$$

$$\langle T_p \rangle = \frac{2}{R^2} \int_0^R T_p(r) r dr$$

Спектральный радиационный поток, излучаемый плазмой разряда в заэлектродные объемы  $\langle F_v \rangle$ , приближенно можно представить в виде:

$$\langle F_v \rangle = \pi I_{pv}(\langle T_p \rangle) \cdot \left[ \exp(-K_v L) \sin^2 \Theta_0 - \int_0^{\pi/2} \exp\left(-K_v \frac{R}{\sin \Theta}\right) \cdot \cos \Theta \sin \Theta d\Theta \right]$$

где  $\Theta = \arctg(R/L)$ ,  $I_{pv}(\langle T_p \rangle)$  – равновесная интенсивность.

Давление в лампе для каждого момента времени определялось по формуле:

$$p(t) = \frac{p_{0эф}(t)}{2 \frac{T_0}{\mu_0} \int_0^1 \frac{\mu_p(z)zdz}{T_p(z)}},$$

а эффективное начальное давление в виде:

$$p_{0эф} = 2kT_0 \int_0^1 n_T(z)dz$$

где  $n_T(z)$  – распределение концентрации тяжелых частиц по сечению разряда рассчитывалось по формуле:

$$p_{0эф} = \frac{p_0(1+b)}{1 + \frac{b}{2} \left[ \int_0^1 \frac{\mu(y)dy}{T(y)} \right] \cdot \left[ \int_0^1 \frac{\mu_p(z)zdz}{T_p(z)} \right]^{-1}}$$

где  $p_0$ ,  $T_0$ ,  $\mu_0$  – начальные значения давления, температуры и молекулярной массы рабочего газа,  $b=V_3/V_p$  – относительная величина балластных объемов; безразмерные координаты  $y=x/l$  в заэлектродной области и  $z=r/R$  в зоне разряда;  $\mu(y)$ ,  $\mu_p(z)$  – распределение массы рабочего газа по длине заэлектродной области и по сечению разряда, соответственно.

#### 2.1.4. Расчетные исследования влияния заэлектродных объемов на характеристики импульсного ксенонового разряда

Для проведения вычислительного эксперимента параметры разрядного контура варьировались таким образом, чтобы длительность импульса изменялась в диапазоне  $10^{-4} - 10^{-3}$  с, а потери в контуре составляли 10 – 25% [100]. В качестве объекта расчетного исследования была взята импульсная лампа с диаметром разрядного канала 7 мм и межэлектродным расстоянием 80 мм, наполненная ксеноном при различных давлениях в холодном состоянии при соотношении  $b=V_3/V_p=0,17$ . Моделирование работы лампы осуществлялось при варьировании энергии, вводимой в разряд. Параметры разрядного контура: емкость разрядного конденсатора  $C_k=6 \cdot 10^{-4}$  Ф, индуктивность контура  $L_k=8 \cdot 10^{-5}$  Гн; напряжение на лампе  $U_0=1000$  В и 2000 В.

На рисунках 2.1 – 2.3 представлены полученные в результате реализации математической модели (уравнения (2.1) – (2.10) и (2.14) – (2.17)) временные зависимости плотности тока, рабочего и эффективного начального давления в импульсной газоразрядной лампе при различном давлении ксенона в холодном состоянии. Как видно из полученных зависимостей в заэлектродные объемы уходит 40 – 50 % наполняющего газа, который вытесняется практически за время достижения током максимума  $\tau_m$  (на рисунках 2.1 – 2.3  $\tau_m \sim 250$  мкс). На протяжении периода спада тока  $p_{0эф}$  не изменяется, т.е. квазистационарное состояние в разряде реализуется при  $p_{0эф} = \text{const}$ . Эти результаты качественно согласуются с экспериментальными данными, полученными на основании интерферометрических измерений [101].

Проанализируем представленные на рисунках 2.1 – 2.3 зависимости. Если принять за скорость установления квазистационарной стадии разряда достижение значения максимальной плотности за определенное время, то, согласно рисунку 2.1, при напряжении  $U_0 = 2000$  В она составит  $1,08 \cdot 10^6$  кА/(см<sup>2</sup>·с) и  $0,7 \cdot 10^6$  кА/(см<sup>2</sup>·с) для  $U_0 = 1000$  В. Различие в скоростях наращивания плотности тока объясняется различием вкладываемой в разряд энергии, и как следствием, температурой рабочего газа и давлением плазмообразующей среды (кривые 2 и 3 на рисунке 2.2).

Эффективное давление газа характеризует усредненное давление в разряде и заэлектродном пространстве. Как видно из графика 2.3 увеличение энергии разряда (напряжения на накопительном конденсаторе) приводит к более быстрому уходу рабочего газа (кривая 3) в балластный объем, чем при более низком  $U_0$  (кривая 2). При этом, чем меньше давление ксенона в холодном состоянии, тем быстрее происходит заполнение заэлектродного объема рабочим газом (см. кривые 1 и 4 на рисунке 2.3). Это явление связано с ростом средней температуры разряда и радиального профиля температуры.

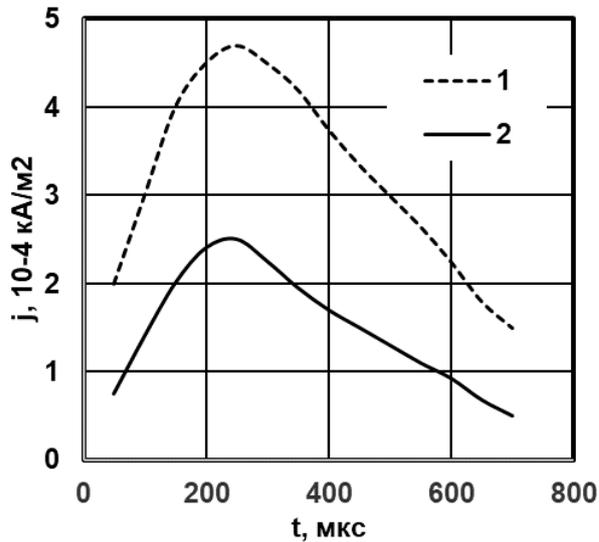


Рисунок 2.1. Временная зависимость средней плотности тока при напряжении на накопительном конденсаторе  $U_0=1000$  В (1) и 2000 В (2)

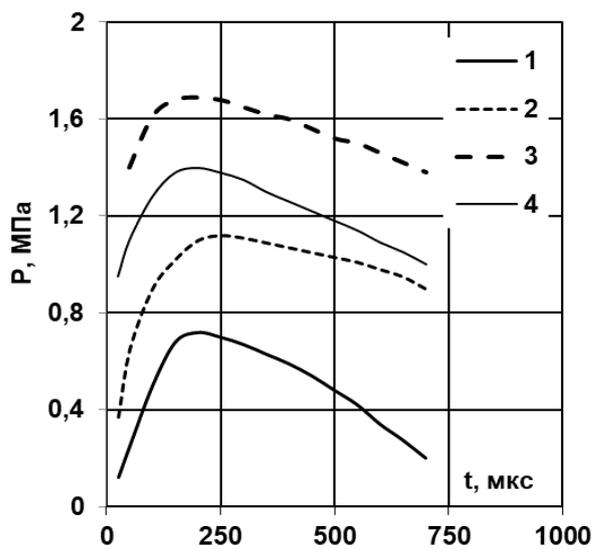


Рисунок 2.2. Временная зависимость рабочего давления в лампе при начальном давлении ксенона в лампе:

1 – 0,04; 2 – 0,053 ( $U_0= 1000$  В);  
3 – 0,053 ( $U_0= 2000$  В); 4 – 0,078 МПа

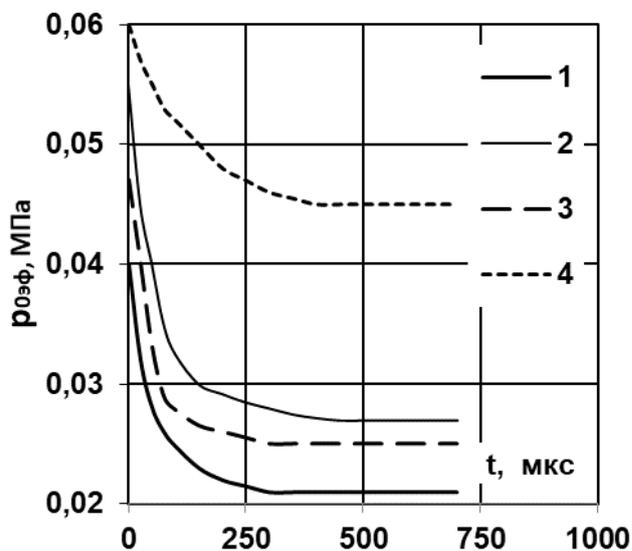


Рисунок 2.3. Временная зависимость эффективного давления в лампе при начальном давлении ксенона в лампе:

1 – 0,04; 2 – 0,053 ( $U_0= 1000$  В);  
3 – 0,053 ( $U_0= 2000$  В); 4 – 0,078 МПа

В то же время средняя температура разряда и амплитуда импульса напряжения зависят от объема заэлектродного пространства. Чем  $V_3$  больше температура (рисунок 2.5.) и ниже максимальное значение давления.

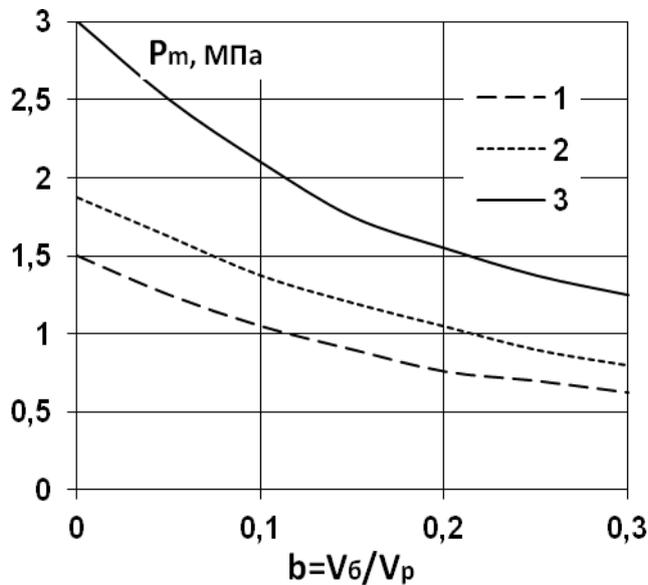


Рисунок 2.4. Зависимость максимального за импульс тока давления от величины заэлектродных объемов

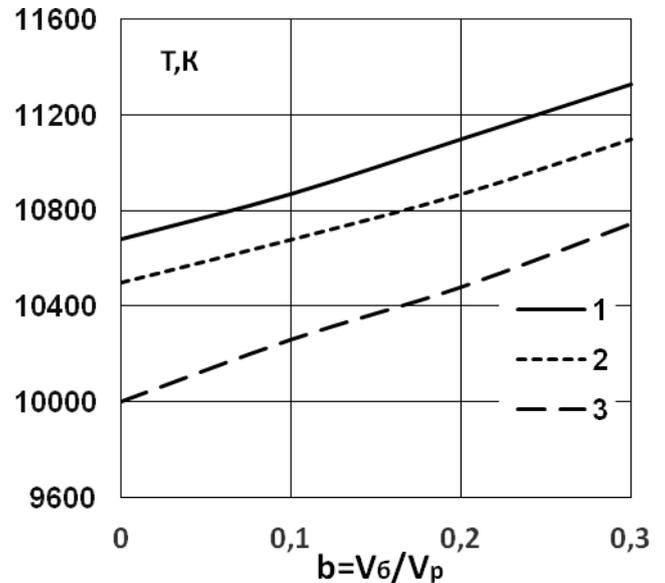


Рисунок 2.5. Зависимость средней температуры разряда давления от величины заэлектродных объемов

Ближкие значения показателей степени при  $\langle W_\tau \rangle$  и  $\tau_m$  показывают, что количество вытесненного газа определяется энергией, вводимой в разряд на стадии нарастания тока, а не длительностью импульса, как получено в работе [102]. Характер изменения средней температуры в заэлектродной области по времени аналогичен изменению  $p_{0эф}$ . Установившееся значение ее составляет примерно 30 % от средней температуры в разряде.

Обработка результатов численных расчетов с помощью математического аппарата корреляционного анализа [103] дает аппроксимационную формулу для  $p_{0эф}$ :

$$p_{0эф} = p_0 - 0,142 p_0^{0,79} \cdot V_p^{-0,83} \cdot V_3^{0,78} \cdot \langle W_{t_m} \rangle^{0,188} \cdot t_m^{0,18}$$

где  $\langle W_{tm} \rangle$  – средняя удельная электрическая мощность, рассеиваемая в разряде за время  $t_m$ , в кВт/см<sup>3</sup>,  $p_{0эф}$  и  $p_0$  в МПа,  $V_z$  и  $V_p$  в см<sup>3</sup>, а  $t_m$  в мкс. Близкие значения показателей степеней при  $\langle W_{tm} \rangle$  и  $t_m$  свидетельствуют о том, что количество газа в зоне разряда определяется в основном величиной энергии, вводимой в лампу на стадии нарастания тока, а не длительностью импульса [102]. Для инженерных расчетов можно рекомендовать также формулу:

$$p_{0эф} = p_0 - 0,416 p_0^{0,79} \cdot V_p^{-0,83} \cdot V_z^{0,78} \cdot j_{max}^{0,27} \cdot t^{0,09}$$

где  $j_{max}$  – максимальная плотность тока в кА/см<sup>2</sup>,  $t$  – длительность импульса на уровне  $0,35I_{max}$ , в мкс.

В работах [95, 96] при определении концентрации тяжелых частиц использовалась относительная величина относительной температуры в заэлектродных областях  $a = \langle T_z \rangle / \langle T \rangle$ . В [96] величина  $a$  не превышала 0,1. В то же время в [95] дается  $a \sim 0,8$ . В проведенных нами расчетах значения  $a_m = a(t_m)$  составляли 0,3 – 0,45.

Распределение радиационного потока, излучаемого плазмой из балластных объемов, в радиальном направлении, качественно согласуется с измеренным в [104] распределением яркости по длине на заэлектродной области.

Анализ расчетных данных показывает, что отношение  $b = V_z / V_p$  не является обобщенным параметром, и поэтому сравнение характеристик различных импульсных ламп следует проводить при одинаковых рабочих и заэлектродных объемах.

В пределах допусков на изготовление ламп величина балластных объемов может изменяться в широких пределах [40]. Это приводит к существенному изменению некоторых характеристик разряда (рисунки 2.4 и 2.5). Например, величина максимального рабочего давления в рассматриваемой лампе типа может отличаться примерно в 2 раза при изменении  $b = V_z / V_p$  в диапазоне  $0 \leq b \leq 0,2$ .

Расчеты показывают слабую чувствительность характеристик ламп к изменению линейных размеров заэлектродных областей при  $V_z = \text{const}$ , что позволя-

ет, по-видимому, заменять в расчетах сложные конфигурации балластных объемов цилиндрическими щелевыми каналами.

Таким образом, выполненное в работе сопоставление расчетных и экспериментальных данных по основным характеристикам импульсных ламп позволяет сделать выводы:

- О справедливости допущений, положенных в основу разработанной модели разряда с учетом вытеснения газа в заэлектродные объемы, и возможности ее использования для расчета характеристик трубчатых газоразрядных источников излучения с различными конструктивными особенностями.
- Определяющими факторами состояние разряда в предлагаемой конструкции являются размеры заэлектродного объема, исходное давление ксенона, величина энергии, вкладываемой в разряд.

#### 2.1.5. Экспериментальное подтверждение ухода рабочего газа из плазменного канала в заэлектродный объем

Решение вопроса точного подтверждения представленных в разделе 2.1.4 результатов возможно только при разработке сложной экспериментальной установки, в основу которой заложен принцип введение в разрядный и заэлектродные объемы пьезоэлектрических импульсных датчиков давления [51]. Если в зону межэлектродного объема ввести такой регистратор не сложно, то в области балластного пространства реализация, предложенного в работе [51] устройства, технологически не возможна.

Поэтому в наших экспериментах мы ограничились качественной оценкой правильности принятого заключения о уходе газа в заэлектродные зоны. Для этого была собрана экспериментальная установка (рисунок 2.6) на основе инерционных мановакуумметров типа ВО. Представленная на рисунке конструкция наполнялась ксеноном до давления 250 мм рт. ст. и подключалась к серийной установке «Альфа-01». В случае подачи электрического питания на лампу

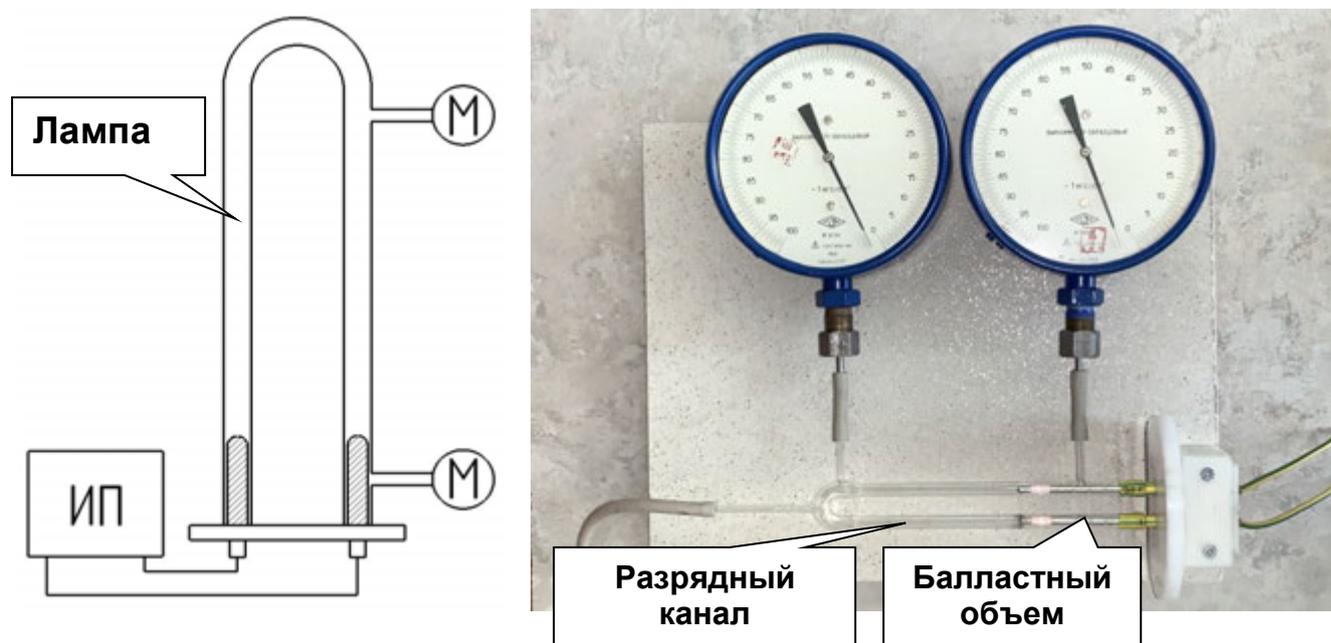


Рисунок 2.6. Блок-схема и фото экспериментальной установки для исследования ухода рабочего газа в заэлектродный объем при работе лампы.

ИП – Источник электрического питания газоразрядной лампы, М – манометр

в течение каждой вспышки наблюдалось увеличение давления в заэлектродном объеме на 53 мм рт.ст. В разрядном объеме давление сохранялось неизменным. Наблюдаемое экспериментальных данных несоответствие расчетным данным (рисунок 2.2) связано с инерционностью применяемых манометров и наличием дополнительных балластных объемов, образованных соединительными патрубками. Тем не менее эффект повышения давления в заэлектродном объеме нами качественно подтвержден.

Таким образом, нами выявлено, что в плазменном канале на стадии формирования квазистационарного состояния разряда из-за ухода ксенона в балластные объемы импульсной лампы давление газа в межэлектродном промежутке уменьшается на 40 – 50 %, а установившееся значение температуры заэлектродной полости достигает 30 % от средней температуры в плазме.

## 2.2. Экспериментальные установки и методики исследований электрических параметров и характеристик УФ-излучения импульсных газоразрядных ламп.

Разработка импульсных источников УФ-излучения имеет целый ряд принципиальных особенностей в сравнении, например, с лампами накачки лазеров, обеспечивающих преимущественное излучение в ближнем ИК диапазоне [8]. Эти отличия заключаются в необходимости обеспечения надежного зажигания и быстрого выхода в номинальный режим работ, а также стабильных во время функционирования характеристик излучения, определяемых конструкцией лампы и параметрами разрядного контура. Для решения задачи создания оптимальной конструкции импульсного источника УФ-излучения требуется создание многофункциональной экспериментальной аппаратуры и разработка соответствующих методик измерения характеристик излучения в ультрафиолетовом диапазоне спектра. В данном разделе будут рассмотрены особенности источников электрического питания, ламп, методики регистрации УФ-излучения и температурного распределения кварцевых оболочек. Подробное описание других оригинальных методов исследований будет представлено при рассмотрении полученных результатов конкретных экспериментов.

### 2.2.1. Экспериментальные источники питания газоразрядных ламп

В наших исследованиях использовались два типа источников электрического питания газоразрядных ламп:

1. Серийная установка «Альфа-1», дополненная делителем напряжения, токовым трансформатором и системой регистрации УФ-излучения. Основные параметры разрядного контура и электрические выходные характеристики:

- Напряжение на лампе 2500 В
- Емкость рабочего конденсатора 98 мкФ
- Частота следования токовых импульсов 2,5 Гц
- Электрическая мощность, не более 1000 Вт

2. В качестве второго источника электрического питания разрабатываемой лампы применялась установка, разработанная сотрудниками ООО «НПП «Мелитта», блок схема которой представлена на рисунке и подробно описанная в работах [7, 105, 108].

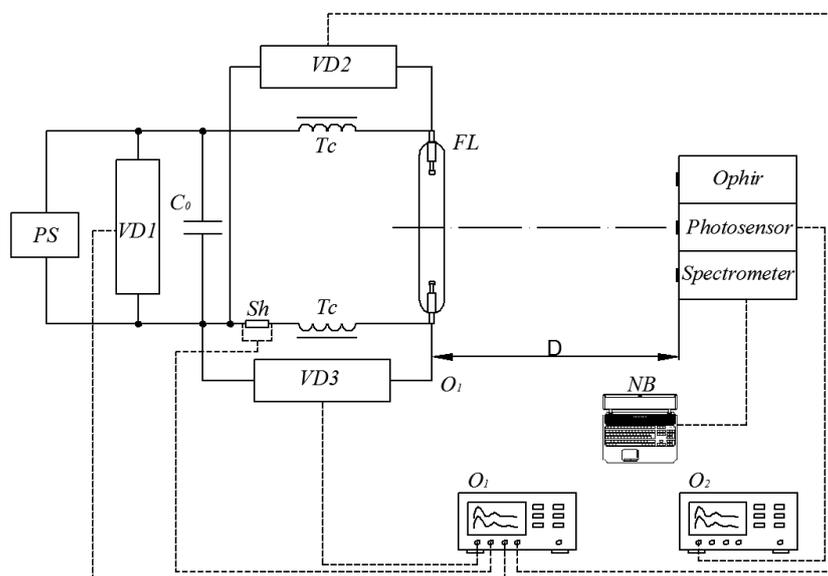


Рисунок 2.7. Блок-схема экспериментальной установки исследования электрических параметров и характеристик УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп [105, 108].

PS – зарядный блок, VD1, VD2, VD3 – делители напряжения, C<sub>0</sub> – разрядный конденсатор, Sh – безындуктивный шунт, T<sub>c</sub> – катушка поджига, FL – импульсная газоразрядная лампа, O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> – осциллографы, NB – ноутбук.

Рассмотрим кратко некоторые особенности функционирования и исследования электрических характеристик импульсных ламп посредством указанного испытательного стенда. Регистрация импульса тока лампы осуществлялась посредством калиброванного коаксиального безындуктивного токового шунта *Sh* (рисунок 2...) типа SDN-001 с минимальным временем нарастания сигнала 30 нс и сопротивлением 1,012 мОм. Указанный шунт устанавливался между рабочим

конденсатором  $C_0$  и трансформатором поджига  $Tc$ , что позволило исключить влияние высоковольтного импульса зажигания на осциллограммы разрядного тока.

Падение напряжения регистрировалось, как на разрядном промежутке исследуемой лампы  $FL$ , так и на рабочем конденсаторе  $C_0$  с помощью трех малоиндуктивных делителей напряжения  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$  смешанного типа Pintek HVP-39Pro со временем нарастания, не превышающим 2 нс. Делитель напряжения  $VD1$  устанавливался параллельно разрядному конденсатору, в то время как  $VD2$  и  $VD3$  присоединялись сигнальными выводами к электродам лампы, а земляными контактами к минусовой обкладке конденсатора  $C_0$ . Полученные временные зависимости падения напряжения с  $VD2$  и  $VD3$  вычитались друг из друга, в результате такой коммутации регистрировалась временная характеристика падения напряжения на лампе. Сигналы с токового шунта  $Sh$  и всех делителей напряжения  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$  выводились на четырехканальный осциллограф TDS2024C. Отсутствие разности потенциалов между соединенными точками устраняет ее влияние на окончательный результат измерения напряжений и снижает вероятность отказа осциллографа.

Таким образом, в наших исследованиях представлялась возможность за один импульс записать согласованные между собой по времени осциллограммы тока, падения напряжения на лампе и рабочем конденсаторе.

Дальнейшая обработка осциллограмм заключалась в вычислении импульсной мощности, вкладываемой в контур и лампу, путем перемножения соответствующих осциллограмм тока и напряжения, и вычисления электрической энергии в контуре и лампе, полученной за счет интегрирования мощности.

Рассмотренные источники электрического питания импульсной ксеноновой лампы работали в двух режимах: полный разряд рабочего конденсатора или наложение разряда конденсатора плазменный канал, горение которого поддерживается слаботочным стабилизатором тока (вспомогательный разряд, дежурная дуга) [64, 105 – 107].

Кроме этого, дежурная дуга выполняет и другие функции. При токе 0,5 – 1,0 А канал вспомогательного разряда расположен концентрично относительно

оболочки горелки. Развитие основного разрядного импульса в этом случае происходит за счет симметричного расширения плазменного канала, поэтому отсутствует локальный перегрев внутренней поверхности кварцевой оболочки, что повышает долговечность газоразрядной лампы.

Энергия разряда рабочего конденсатора ( $W$ ) в приведенной блок-схеме (рисунок 2.7) рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{C_{\kappa} \times U_p^2}{2};$$

где  $C_{\kappa}$  – ёмкость рабочего конденсатора,  $U_p$  – напряжение на рабочем конденсаторе.

### 2.2.2. Методики исследования характеристик УФ-излучения импульсного ксенонового разряда

Основной характеристикой УФ-излучения разрабатываемой лампы является спектральная плотность энергетической экспозиции  $W$  (ГОСТ 8.552-2013), характеризующая энергетическую облученность поверхности. На рисунке 2.8 приведена блок-схема системы измерения характеристик УФ-излучения импульсной ксеноновой лампы.

В наших исследованиях расчет величины спектральной плотности энергетической экспозиции ( $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{нм}$ ) в спектральном диапазоне от  $(237 \pm 5)$  нм до  $(269 \pm 5)$  нм на расстоянии 1 м осуществлялся по формуле:

$$W = \frac{U_m \cdot \tau \cdot L^2 \cdot N}{S \cdot \Delta\lambda \cdot L_0^2}, \quad (2.18)$$

где  $U_m$  – измеренная амплитуда сигнала с осциллографа, В;

$\tau$  – экспериментальная постоянная времени интегрирования, с;

$S$  – вольтваттная чувствительность фотодетектора,  $\text{В} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ ;

$L$  – расстояние от оси лампы до фотоэлемента (рисунок 2.8), см;

$\Delta\lambda$  – эффективная ширина спектральной характеристики чувствительности фотодетектора, нм;

$N$  – характерное количество импульсов работы электрического источника питания (раздел 2.2.1).

$L_0$  – расстояние, на которое ведется пересчет спектральной плотности энергетической экспозиции, м.

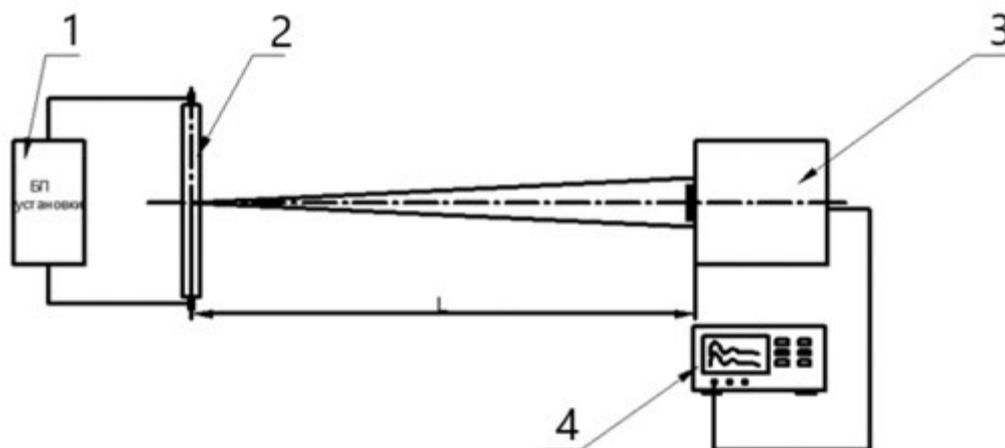


Рисунок 2.8 Структурная схема установки для измерения характеристик УФ-излучения разрабатываемой лампы.

1 – источник электрического питания лампы (раздел 2.2.1), 2 – исследуемая лампа, 3 – фотоприемное устройство; 4 – осциллограф TDS-2004

Для фотоприемного устройства выполняется калибровка с получением спектрального распределения относительной чувствительности, нормированной на его максимальное значение, и значения вольтовой чувствительности, характеризующей ее применительно к схеме включения приемника, на длине волны максимума чувствительности. Измерение полной энергии излучения проводилось при помощи калиброванного чернотельного приемника излучения Ophir PE50BB-DIF, обладающего наиболее постоянной спектральной чувствительностью во всем диапазоне регистрации (0,19 – 20 мкм). Подробно вопросы измерения спектрально-энергетических характеристик импульсных газоразрядных ламп и методика калибровка фотоэлектрических приемников импульсного излучения рассмотрены в работах [105, 108, 109].

### 2.2.3. Разработка методики исследования температурных полей оболочек импульсных газоразрядных ламп

Для изучения тепловых профилей поверхности разрядных оболочек широко применяют термопарные методы, что объясняется относительной простотой измерений, возможностью выявления температуры ( $T_{об}$ ) небольших участков колбы (около 1 мм<sup>2</sup>) с диапазоном измеряемых температур, полностью перекрывающим рабочие  $T_{об}$  [20, 110 – 112]. В то же время измерение распределения температуры оболочки имеет ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при выборе конструкции термопары и оценке погрешности измерения температуры. Во-первых, измеряются температуры поверхности, как правило, тонкостенных оболочек, имеющих коэффициент теплопроводности  $\chi$  примерно на два порядка ниже, чем  $\chi$  материала термоэлектродов. Во-вторых, недостаточный тепловой контакт термоспая с измеряемой поверхностью. В-третьих, оболочки, на поверхности которых измеряется температура, прозрачны, и на термопару воздействует лучистый поток, выходящий из разряда. Поэтому перечисленные проблемы ставят задачу поиска новых способов регистрации температуры полупрозрачных материалов (стекло, кварц, сапфир) оболочек газоразрядных ламп.

Исключить указанные недостатки позволяют методы пирометрии. В силу объемного характера излучения оптических полупрозрачных материалов при пирометрическом измерении температуры необходимо использовать специальные ИК приемники, работающие в области непрозрачности исследуемого объекта [113, 114]. При нагреве от комнатной до рабочей температуры оболочки лампы интервал непрозрачности материала оболочки в диапазоне длин волн, который можно использовать для пирометрии, меняется. Причем при нагреве для большинства материалов наблюдается смещение ИК границы пропускания, расположенной в области спектральной чувствительности приемника, в коротковолновую область. По этой причине для измерений температуры наиболее пригодной является коротковолновая граница первой колебательной полосы поглощения полупрозрачных материалов, где величина и температурная зависимость коэффициен-

та поглощения  $k_\lambda$  материала оболочки связаны с ангармонизмом колебаний решетки. В этой области  $k_\lambda$  может достигать  $k_\lambda = 10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-1}$ , а излучательная способность нагретой оболочки приближается к единице [110]. В связи с малым значением коэффициента отражения  $k_r$  в рабочей области спектра пирометра его влияние на результаты измерений незначительно. Поэтому, если на приемник попадает излучение из этой части области нагретого материала, то сигнал приемника будет однозначно связан с температурой поверхности оболочки из этого материала.

В работе [20] показано, что у кварцевого стекла в спектральном диапазоне 8 – 10 мкм коэффициент излучения нагретого материала приближается к единице. По этой причине для проведения экспериментов по определению температурных полей оболочек газоразрядных ламп нами выбрана тепловизионная система SDS HotFind-LXT (рабочий спектральный диапазон 7,5 – 14 мкм), построенная на использовании многоэлементных приемников излучения, т.е. матриц, число элементов которых позволяет сформировать телевизионный кадр с хорошим пространственным разрешением. Таким образом, наблюдаемое совпадение спектральных диапазонов излучения нагретых исследуемых материалов оболочек с областью чувствительности используемого ИК приемника, дает полное основание применить тепловизионную систему SDS HotFind-LXT с достаточной точностью для наших температурных исследований.

Предложенная методика успешно апробирована при исследовании газоразрядных ламп с различной конфигурацией плазменного канала (точечной, цилиндрической, спиральной и т.д.), ограниченного сапфировой или кварцевой оболочками [114, 115].

### 2.3. Исследование зависимости электрических параметров и характеристик УФ-излучения от величины заэлектродных объемов.

В разделе 2.1.4 теоретически обосновано влияние заэлектродного объема  $V_3$  на состояние плазмы в разрядном промежутке импульсной ксеноновой лампы.

Согласно диаграмме, приведенной на рисунке 1.1, снижение давления и рост температуры на оси повлияют на электрические параметры и характеристики УФ-излучения ламп. Поэтому возникает необходимость выяснения влияния величины заэлектродного объема  $V_3$  на параметры плазмы, разрабатываемой импульсного ксенонового источника УФ-излучения.

### 2.3.1 Методика эксперимента и особенности конструкции токовыводов.

В настоящее время имеется ограниченное количество научных работ [8, 91, 92, 102], посвященных исследованию влиянию балластных объемов  $V_3$  на характеристики импульсной ксеноновой лампы, которые в качестве параметра используют параметр  $V_3/V_p$ , где  $V_p$  – величина объема разрядного промежутка. Для сопоставления экспериментальных данных указанных авторов с нашими результатами нами было использовано это соотношение  $V_3/V_p$ . Для реализации поставленной цели была изготовлена партия импульсных ксеноновых ламп с U-образным плазменным каналом, в которых величина заэлектродного объема регулировалась увеличением специальной проточки меньшего диаметра (рисунок 2.9).

Как следует из приведенного рисунка конструктивная возможность реализации экспериментального электродного узла может обеспечить только интервал флуктуации соотношения  $V_3/V_p$ , в диапазоне от 0,16 до 0,3.

Все экспериментальные лампы идентично заполнялись ксеноном до давления 250 мм рт. ст. в холодном состоянии и исследовались на серийных установках «Альфа-1» в номинальном режиме работы. При исследованиях регистрировались осциллограммы импульсов тока, энергетическая экспозиция УФ-излучения и температурные поля разрядной оболочки.

### 2.3.2. Влияние величины заэлектродного объема на характеристики разряда.

Как отмечалось в разделе 1.4, при высоких концентрациях энергии и значительной длительности импульса ( $t_u \geq 10^{-3}$  с) происходит уход значительной доли рабочего газа в заэлектродные объемы и, как следует из раздела 2.1.4 плотность

частиц  $n_p$  к моменту достижения максимума тока становится меньше почти в два раза от начальной концентрации  $n_0$ . Данный процесс равносителен снижению исходного давления в разряде [8]. Проведем анализ времени установления  $t_y$  газодинамического равновесия (момент достижения квазистационарной стадии разряда).

В работе [8] для обычной конструкции импульсных трубчатых ламп отношение заэлектродного объема  $V_3$  к рабочему объему  $V_p$  лежит в пределах 0,04 – 1,0 (аналогично нашему случаю), для которых справедливо выражение [90]:

$$\frac{n_t}{n_0} = 0,65 \cdot \frac{1 + \frac{V_3}{V_p}}{1 + 4 \cdot \frac{V_3}{V_p}} \quad (2.19)$$

Скорость ухода  $v_y$  газа в заэлектродные объемы составляет около  $5 \cdot 10^4$  см/с, что соответствует скорости звука при усредненной по объему канала температуре.

Исходя из этого время установления  $t_y$ , которое существенно зависит от длины разрядного промежутка, определяется выражением [102]:

$$t_y = \frac{l(1 - \frac{n_t}{n_0})}{2v_y} \quad (2.20)$$

где  $n_t$  – концентрация частиц при установления гидродинамического равновесия.

Совместное решение уравнения (2.19) и (2.20) для граничных точек полученного нами экспериментального диапазона  $0,16 < V_3/V_p < 0,3$  позволили определить время установления газодинамического равновесия 150 и 160 мкс, соответственно. Сопоставление с полученными в результате реализации математической модели расчетными данными, приведенными на рисунках 2.2 и 2.3, показывает удовлетворительное совпадение и дополнительно подтверждает адекватность предложенных уравнений (2.14) – (2.17).

На втором этапе проводились экспериментальные исследования, направленные на выявление влияния заэлектродного объема на плотность тока и энергетическую экспозицию в УФ-диапазоне спектра. Полученные результаты представлены на рисунках 2.10 – 2.12.



Рисунок 2.9. Фото электродных узлов, демонстрирующее способов регулирования заэлектродного объема  $V_3$ .

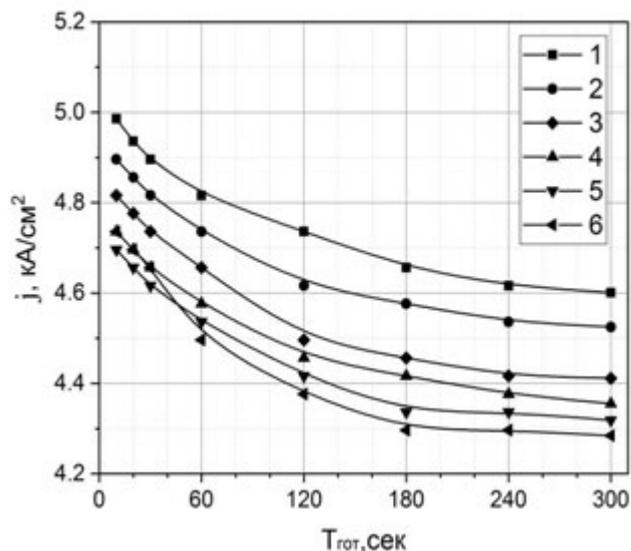


Рисунок 2.10. Временная зависимость плотности разрядного тока для различных соотношений  $V_3/V_p$ : 1 – 0,16; 2 – 0,192; 3 – 0,218; 4 – 0,244; 5 – 0,270; 6 – 0,3.

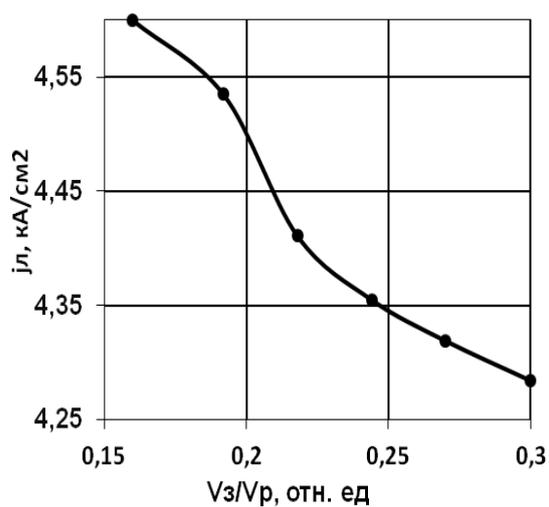


Рисунок 2.11. Зависимость плотности тока  $j_l$  в квазистационарной стадии разряда от соотношения  $V_3/V_p$

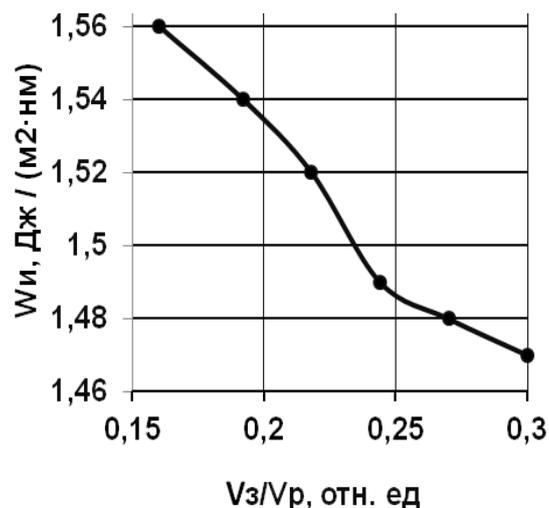


Рисунок 2.12. Зависимость энергетической экспозиции излучения  $W_u$  в спектральном диапазоне 200 – 300 нм от соотношения  $V_3/V_p$ .

Из представленных данных можно сделать следующие заключения:

- Плотность тока в квазистационарной стадии импульсного ксенонового разряда  $j_l$  и энергетическая экспозиция  $W_u$  в ультрафиолетовом диапазоне с увеличением  $V_z/V_p$  корреляционно уменьшается по закону близкому к линейному (рисунки 2.11 и 2.12).
- Увеличение  $V_z/V_p$  в два раза приводит к снижению  $j_l$  и  $W_u$  на 7%.
- При выходе в номинальный режим работы импульсной ксеноновой лампы по мере повышения средней температуры разряда плотность тока снижается для всех соотношений  $V_z/V_p$  по идентичному закону (рисунок 2.10).
- С момента зажигания разряда до выхода в номинальный режим работы импульсной ксеноновой лампы при увеличении соотношения наблюдается различные падения плотности тока в разряде, например, для  $V_z/V_p = 0,15$   $j_l$  снижается на 7%, в то время как для  $V_z/V_p = 0,3$  эта величина достигает 9%. Данное явление связано с процессом установления газодинамического равновесия (см. уравнения (2.19) и (2.20)).

Таким образом, исходя из приведенных результатов, можно сделать заключение, что при средней удельной мощности 30 Вт/см при увеличении отношения балластного заэлектродного объема  $V_z$  к величине разрядного объема  $V_p$  от 0,15 до 0,3 приводит к корреляционному снижению на 7 % плотности разрядного тока и энергетической экспозиции в спектральном диапазоне 0,2 – 0,3 мкм

#### 2.4. Расчетно-экспериментальные исследования влияния U-образной конфигурации плазменного канала на электрические параметры и температурный профиль оболочки ламп.

Как показано в первой главе, собственное излучение импульсной ксеноновой лампы с U-образной конфигурацией разрядного канала, поглощаясь в плазме, способствует ее дополнительному нагреву. Вследствие этого спектрально-энергетические и электрические характеристики излучения по сравнению с пря-

мым разрядным каналом изменяются. Впервые этот эффект был отмечен в публикациях [28, 29], посвященных газоразрядным лампам накачки лазеров, а последующее теоретическое и экспериментальное его исследование проведено в работах [29, 82 – 85]. В случае ксенонового разряда, т.е в плазме малой оптической плотности, возврат излучения приводит в основном к возрастанию средней температуры разряда. В этом случае может иметь место резкое изменение составляющих энергетического баланса разряда в сравнении с прямой газоразрядной лампой. Например, доля потерь энергии на стенках оболочки может увеличиться до двух раз [29]. Поэтому решение вопроса о влиянии возвращенного обратно в лампу излучения является актуальной научной задачей.

#### 2.4.1. Зависимость температуры разрядной оболочки от взаимного облучения двух частей U-образного плазменного канала.

Нагрев оболочки газоразрядной лампы возвращенным излучением обусловлен двумя факторами – коэффициентом пропускания кварцевого стекла и спектральным составом выходящего из плазмы излучения. Данные вопросы будут отдельно рассмотрены в разделе 2.4.3 при анализе полученных экспериментальных результатов.

Исследование влияния возвращенного в плазму излучения на тепловое поле оболочки строилось на основе следующих положений:

- Необходимо провести сравнение параметров плазмы и температурных профилей без изменения состава плазмообразующей среды, конструктивных параметров разрядной трубки (диаметра и межэлектродного расстояния), анодно-катодного падения потенциала и т.д.
- Предотвратить попадание возвращенного излучения способами, исключающими дополнительный нагрев оболочек.

В ходе разработки методик исследования нами предложено два способа реализации поставленной цели:

1. Размещение между двумя параллельными частями U-образного плазменного канала охлаждаемого проточной водой трубчатого экрана (рисунок) Особенностью предложенной конструкции установки является использование чернения поверхности экрана, исключающего возврат выходящего из плазмы излучения обратно в разрядный канал. По описанной в разделе 2.2.3 методике производились измерения температуры оболочки при наличии охлаждаемого экрана и без него.

2. Для проведения эксперимента по второму методу была изготовлена прямая трубчатая лампа с фиксированным размером плазменного канала (диаметр 7 мм и межэлектродное расстояние 280 мм). По описанной в разделе 2.2.3 методике производились измерения температурного распределения на длине от рабочего торца электрода до середины разрядного канала. Затем посредством огневой обработки разрядному промежутку придавалась U-образная конфигурация и эксперимент повторялся.

Исследования по описанным методикам проводились на установке «Альфа-1» серийного производства. Удельная мощность разряда импульсной ксеноновой лампы в ходе эксперимента составляла  $30 \text{ Вт/см}^2$ . При каждом этапе температурных измерений фиксировалась осциллограмма импульса разрядного тока (раздел 2.2.1).

Полученные результаты температурных исследований представлены на рисунках 2.14 и 2.15. Из полученных данных следует:

1. Температура оболочки в середине каждой из частей U-образного плазменного канала повышается на  $40 - 60^\circ\text{C}$  за счет возврата собственного излучения обратно в разряд.

2. Наблюдаемое различие в ходе кривых на рисунках на расстоянии от 0 до 20 мм обусловлено различие в температурной состоянии электрода, связанном с изменением электропроводности плазмы (раздел 2.4.2).

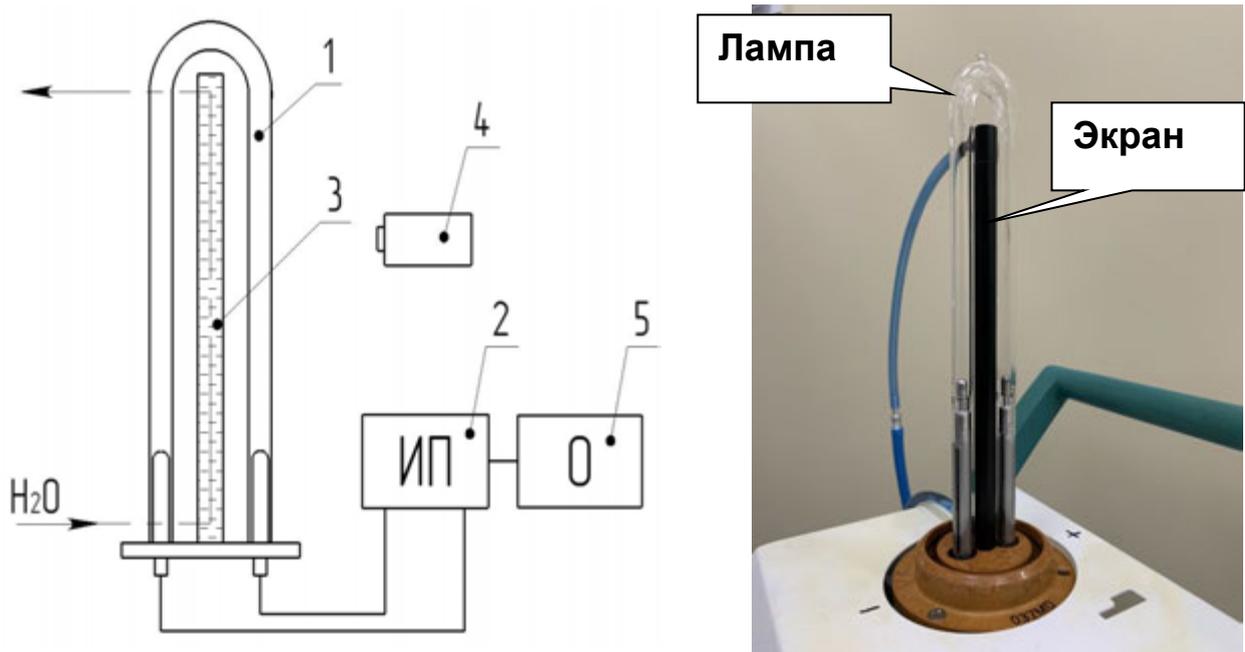


Рисунок 2.13. Блок-схема (а) и фото экспериментальной установки по исследованию влияния взаимного облучения плазменных каналов на температуру оболочки. 1 – исследуемая лампа, 2 – источник электрического питания, 3 – охлаждаемый экран, 4 – пирометр, 5 – осциллограф

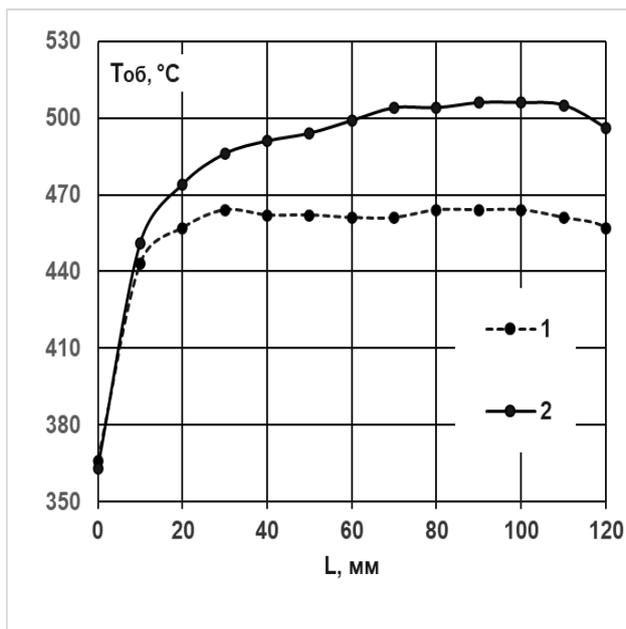


Рисунок 2.14. Распределение температуры разрядной оболочки с охлаждаемым экраном (1) и без него (2).

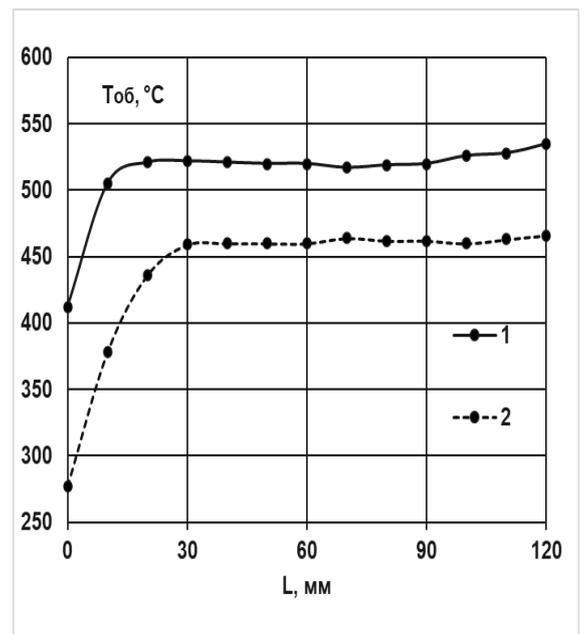


Рисунок 2.15. Распределение температуры разрядной оболочки с прямым (1) и U-образным плазменным каналом(2).

#### 2.4.2. Влияние взаимного облучения двух частей U-образного плазменного канала на электрические характеристики разряда

Как отмечалось в предыдущем разделе в ходе температурных исследований одновременно проводилась регистрация осциллограмм импульсов тока разрабатываемой импульсной ксеноновой лампы. В результате серии экспериментов установлено, что при использовании описанных в разделе 2.3.1 двух способов изучения влияния на характеристики плазмы возвращенного излучения, полученные осциллограммы идентичны, представленным на рисунке 2.16.

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие заключения:

- При удельной электрической мощности  $30 \text{ Вт/см}$  в случае воздействия собственного излучения плазмы в квазистационарной стадии разрядный ток повышается примерно на  $173 \text{ А}$ , что соответствует плотности тока  $430 \text{ А/см}^2$ .
- При подогреве собственным излучением плазмы скорость достижения квазистационарного состояния (максимума тока) возрастает. Так в случае прямой газоразрядной лампы на стадии формирования изотермической плазмы ( $50 \text{ мкс}$ , рисунок 2.16) скорость нарастания тока носит близкий к линейному характер и составляет  $28 \text{ А/мкс}$ , а в случае возврата излучения в разряд она достигает значений  $32 \text{ А/мкс}$ . Этот теплофизический процесс связан с повышением температуры разряда и, как следствие, с ростом проводимости плазмы.

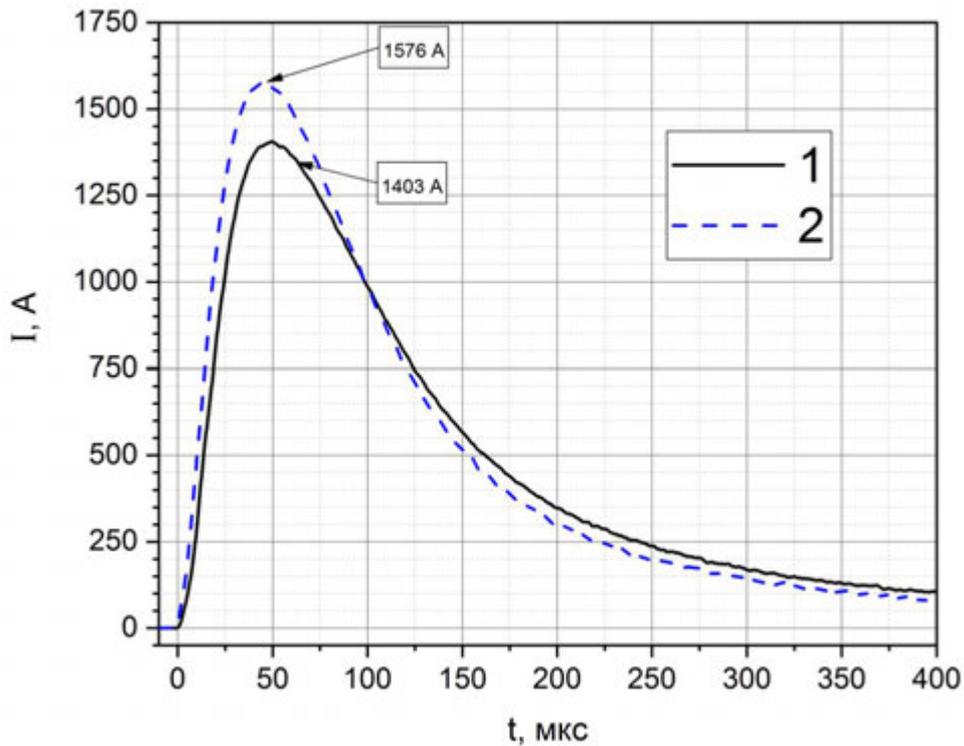


Рисунок 2.16. Осциллограммы импульса разрядного тока импульсной ксеноновой лампы при удельной электрической мощности 30Вт/см

1 – прямой трубчатой лампы, 2 – лампы с U-образным плазменным каналом

- Скорость релаксации плазмы в ходе остывания между импульсами тока также выше, что связано с возрастанием потерь на амбиполярную диффузию в сторону разрядной стенки. Данный эффект также обусловлен повышением средней температуры плазмы [116].

#### 2.4.3. Расчетные исследования влияния на характеристики U-образного плазменного канала коэффициента поглощения и спектра излучения ксенонового разряда

Для выяснения влияния спектрального состава излучения, возвращенного обратно с ксеноновую плазму, на ее электрические характеристики необходимо установить зависимость коэффициента поглощения плазмообразующей среды от длины волны. Для расчётов энергетической эффективности газоразрядных источ-

ников зачастую используют [27, 97] экспериментальные данные по спектральному распределению излучения прямых открытых ламп. При этом привлекаются модели либо абсолютно прозрачного [27], либо абсолютно черного разрядов [27]. Влияние дополнительного нагрева плазмы предлагается учитывать [98] в предположении эквивалентности поглощенной мощности в разряде обычному приросту электрической мощности, рассеиваемой в лампе. В силу высказанных ранее соображений такое предположение не является корректным.

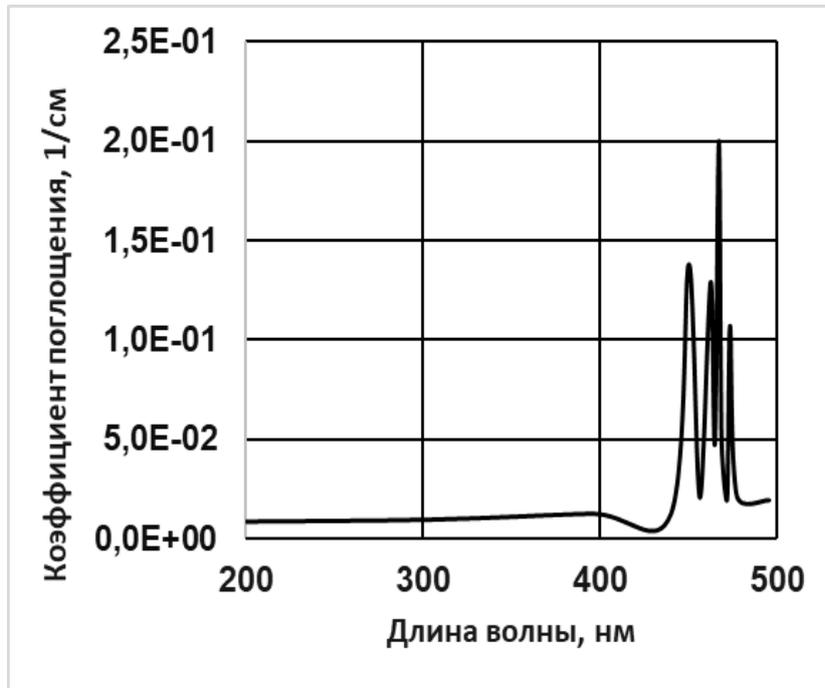
Основными радиационными процессами, определяющими оптические свойства многокомпонентной атомарной плазмы, являются: фотоионизация атомов и ионов (bf-переходы), торможение электронов в полях нейтралов и ионов (ff-переходы), дискретные переходы связанных электронов (bb). Суммарный коэффициент поглощения зависит от длины волны излучения, температуры и давления плазмы (в случае ЛТР) или от длины волны, концентрации частиц, температур электронов и тяжелых частиц, а также их распределения по уровням энергии (в случае неравновесной плазмы). При его вычислении проводится суммирование вкладов перечисленных процессов.

В данной диссертации, как и в работах [57, 97, 98], при расчете коэффициента поглощения  $k_\nu$  учитывались как отдельные спектральные линии, так и непрерывный фон. для определения суммарного коэффициента поглощения атомарных компонент рассчитывается поглощение, связанное с обратным тормозным эффектом в полях нейтральных частиц. Для этого используются результаты работы [27].

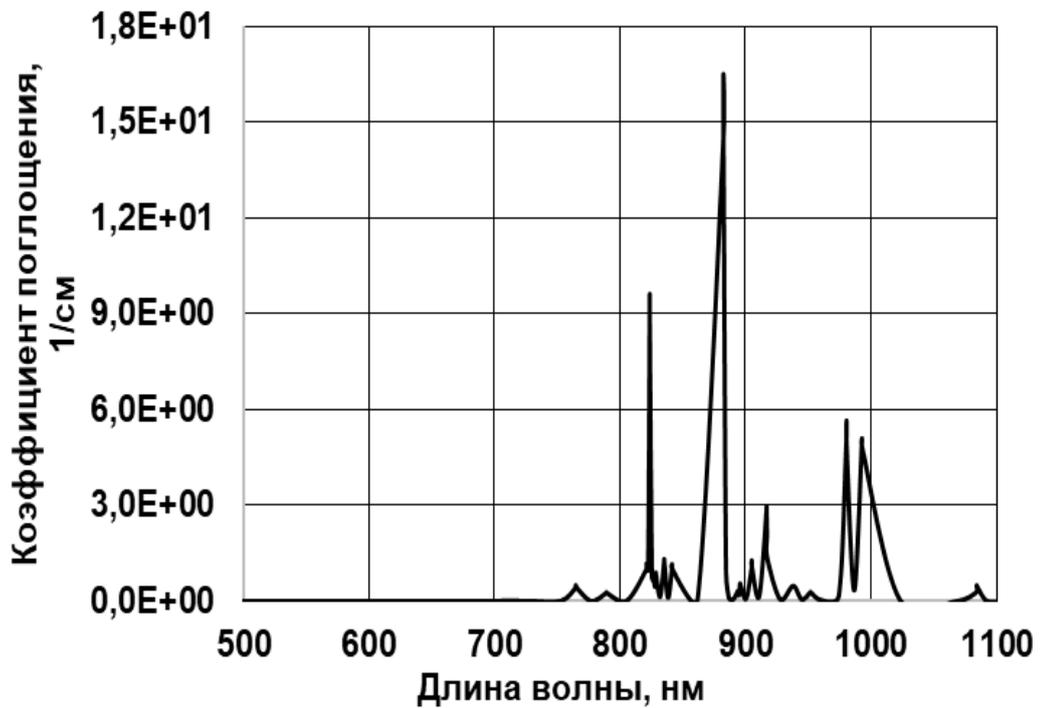
Линейчатый спектр формируется в результате перекрытия крыльев линий, уширенных различными механизмами – штарковским, резонансным, доплеровским, вандерваальсовским. Перенос излучения в линиях сильно осложняет решение задач лучистого теплообмена. Это связано с узостью спектральных линий и их большим количеством.

При расчете коэффициента поглощения принимаются во внимание ударный и доплеровский механизмы уширения, т.е. профиль линии считается фойхтовским. Ударные ширины линий, обусловленные эффектом Штарка, вычисляются

ся в соответствии с нестационарной теорией Собельмана - Вайнштейна [27]. Оценка параметров, определяющих применимость ударного или квазистатического приближений, показывает, что в типичных условиях газового разряда для включенных в расчет линий электроны создают ударное уширение. В то же время возможно квазистатическое уширение ионами. При расчете ударных ширин линий принимается во внимание уширение электронами и ионами. Вклад ионов, как правило, на порядок меньше вклада электронов. В линейчатом спектре контур линии принимался фойхтовским. Ширины линий рассчитывались с учетом штарковского, резонансного, вандерваальсовского и доплеровского механизмов уширения. При расчете непрерывного фона учитывались следующие физические процессы: фотоионизация атомов и ионов всех компонент, обратные тормозные процессы в полях ионов и атомов, фотоионизация отрицательных ионов (фотоотрыв), молекулярное поглощение. Сечения элементарных процессов частично взяты из экспериментов, а большей частью получены расчетным путем. Последнее относится к фотоионизации тяжелых частиц, обратным тормозным процессам в полях нейтралов и ионов, уширению линий атомов под действием штарковского, вандерваальсовского и резонансного механизмов уширения. Подробно алгоритм формирования базы расчетных данных по коэффициенту поглощения изложен в работах Градова В.М. [27, 86 – 92]. В результате выполненных расчетных исследований получен представленный на рисунке 2.17 спектральный коэффициент поглощения ксеноновой плазмы высокого давления  $p=0,1$  мПа при температуре  $T=8000$  К (параметры, характерные для эффективных импульсных ксеноновых источников ультрафиолетового излучения). С такой степенью детализации коэффициент хранится в базе данных.



а)



б)

Рисунок 2.17. Коэффициент поглощения плазмы Хе в спектральном диапазоне 0,2 – 0,5 мкм (а) и 0,5 – 1,1 мкм (б).  $p=15$  атм.,  $T=8000$  К.

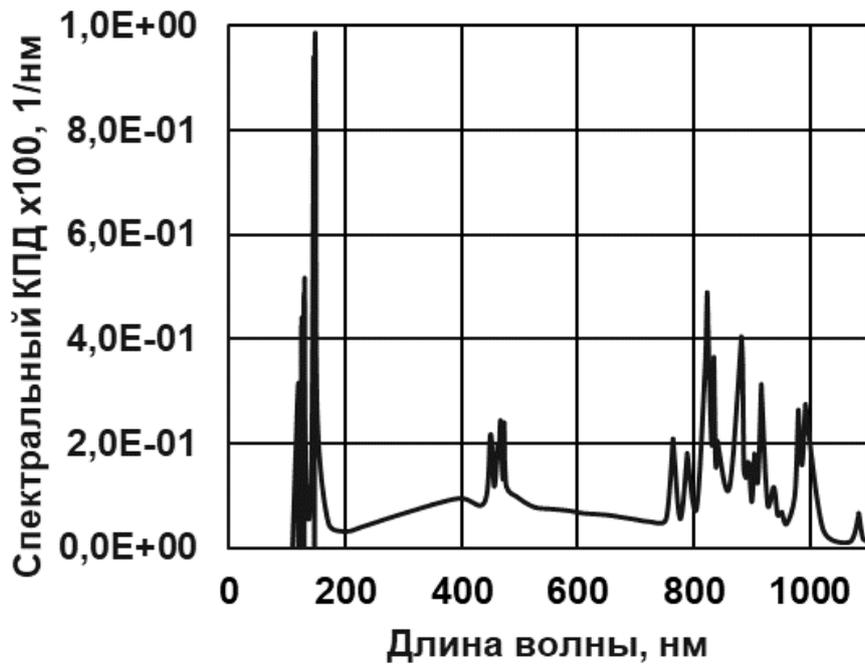


Рисунок 2.18. Спектральное распределение КПД излучения в максимуме тока.

Хе,  $R=0,35$  см,  $p_0=108$  мм рт. ст.,  $\langle w \rangle = 0,3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>3</sup>

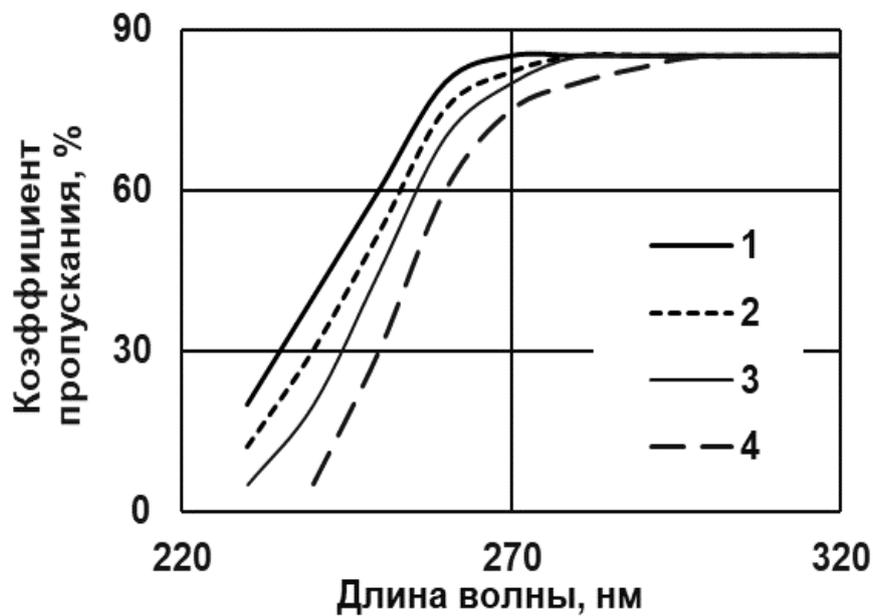


Рисунок 2.19. Спектральное распределение пропускания кварцевого стекла толщиной 0,9 мм при разных температурах [63]: 1 – 20 °С, 2 – 300 °С, 3 – 600 °С, 4 – 900 °С

Для теоретического анализа полученных в 2.4.1 и 2.4.2 экспериментальных результатов рассмотрим расчетные данные, полученные при реализации математической модели, описанной в разделе 2.1 и работах профессора Градова В.М. (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [27, 82 – 84, 86 – 88, 92]. На рисунках 2.17 и 2.18 представлены спектральные распределения коэффициента оптического поглощения плазмы и КПД излучения импульсной ксеноновой лампы в диапазоне длин волн 0,2 - 1,1 мкм. Теоретический анализ выполним в два этапа.

**Температурный профиль кварцевой оболочки импульсной лампы.** Как видно из рисунка 2.18 максимальный спектральный КПД разряда сосредоточен в двух областях: 100 – 200 нм и 750 – 1100 нм. Одновременно, из температурной зависимости спектрального распределения пропускания кварцевого стекла (рисунок 2.19), построенного по данным работы [63], видно УФ-излучение до 200 нм практически не покидает разрядный объем в силу сдвига левой границы оптической прозрачности кварца в сторону больших длин волн при увеличении температуры от комнатных значений до 900 °С. В то же время свыше 270 нм коэффициент пропускания кварцевого стекла достигает 85 %.

Необходимо, что представленные на рисунке данные являются устаревшими и сегодня имеются кварцевые стекла, прозрачность которых достигает 50% при длине волны 200 нм. Тем не менее можно утверждать, что нагрев оболочки, наблюдаемый в случаях, представленных на рисунках 2.17, производится излучением ксенонового разряда с длинами волн менее 200 нм.

**Плотность разрядного тока.** Максимальное поглощение ксеноновым разрядом возвращенного излучения происходит в спектральных диапазонах, где коэффициент  $k_v$  больше единицы. Согласно рисунку 2.18 данная область располагается в диапазоне длин волн 0,8 – 1,1 мкм. По этой причине доля возвращенного излучения импульсной ксеноновой лампы (рисунок 2.17) в указанном спектральном диапазоне будет способствовать подогреву плазмы, повышению средней температуры разряда и, как следствие, увеличению плотности тока. Данное заключение подтверждается результатами, приведенными на рисунке 2.16.

Таким образом, в результате выполненных в разделе 2.4 расчетно-экспериментальных исследований нами установлено, что при средней удельной мощности 30 Вт/см в импульсной ксеноновой лампе с U-образным плазменным каналом за счет взаимного воздействия излучения в спектральном диапазоне менее 0,2 мкм на обращенные друг к другу параллельные поверхности двух частей кварцевой оболочки их температура повышается более чем на 40 – 60 °С, а плотность тока в квазистационарной стадии разряда возрастает на 430 А/см<sup>2</sup> в результате поглощения разрядом излучения с длинами волн более 0,8 мкм.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНЫХ КСЕНОНОВЫХ ЛАМП С КОЛПАЧКОВЫМИ ТОКОВООДАМИ**

Существующие на сегодняшний день конструкторские и технологические решения импульсного источника УФ-излучения с кварцевой разрядной оболочкой в полном объеме не могут решить все проблемы разработки газоразрядной лампы с колпачковыми токовводами. Некоторые технологические операции огневой обработки (придание формы разрядной трубке, штенгелевка и т.д.), теххимическая обработка, вакуумный и водородный отжиги деталей и узлов, спекание порошковых эмиттеров и т.д. могут быть заимствованы при изготовлении разрабатываемых ламп. В то же время особенности предлагаемой конструкции токоввода требуют решения следующих задач:

1. Расчет и исследования конструкции и технологии комбинированных электродов для обеспечения их длительной устойчивой работы в импульсно-периодическом режиме следования токовых импульсов.

2. Создание высокотехнологической конструкции вакуумплотного соединения электродных узлов с кварцевой оболочкой, обеспечивающего механическую прочность и высокие токовые нагрузки.

Решению указанных проблем посвящена данная глава с последовательным изложением результатов исследований, соответствующих перечисленным задачам.

#### **3.1. Особенности конструкции электрода разрабатываемой газоразрядной лампы.**

До настоящего времени в качестве материала электродов наибольшее распространение получил торированный вольфрам марок ВТ-15 и ВТ-50 [8, 20, 117]. Сегодня в силу вредных условий технологии изготовления и сложности воспроизводства свойств указанных материалов на первый план выходит технология по-

рошковой металлургии для получения спеченных металлокерамических электродов на основе вольфрама с присадкой скандата бария [118, 119].

В то же время независимо от используемого эмиссионного материала конструкции катода и анода мало изменяются в случае импульсных ксеноновых ламп (рисунок 3.1). Рабочая поверхность электрода, сопряженная с импульсной ксеноновой плазмой, представляет собой участок  $L_1$  полусферы (зона А) или торцевую часть цилиндра (зона В).

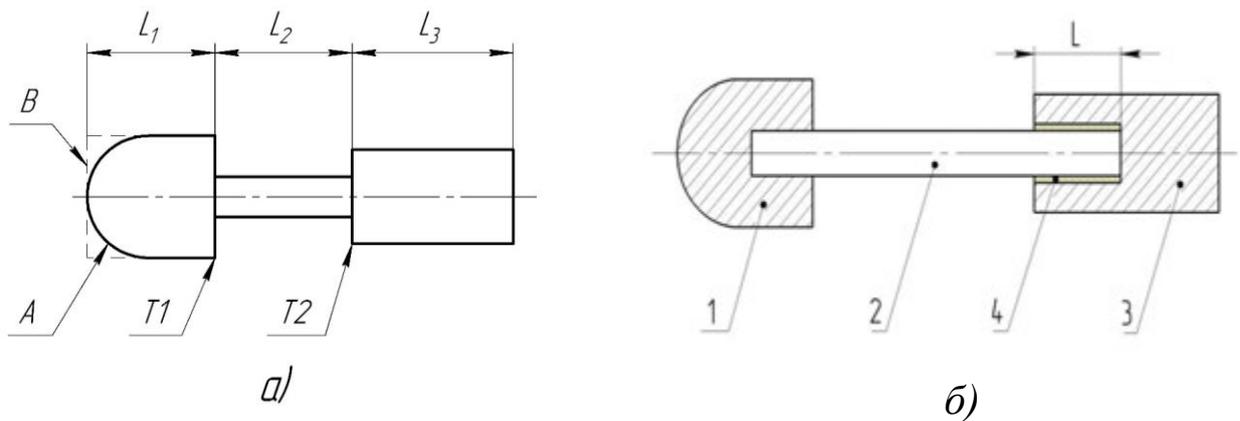


Рисунок 3.1 Конструкция электрода, изготовленного токарной обработкой (а) и посредством предлагаемой технологии (б).

1 – катод (анод), 2 – молибденовый держатель, 3 – молибденовая втулка, 4 – припой.

Далее следует последовательность цилиндрических участков различного диаметра: участок  $L_2$  снижает сброс тепла с рабочей части электрода, обеспечивая поддержание температуры катода для эффективной эмиссии электронов, а участок  $L_3$  предназначен для соединения с токовводом газоразрядной лампы. Представленная на рисунке 3.1,а конструкция электрода выполняется точением из цельнометаллического прутка торированного вольфрама, либо рабочая часть катода  $L_1$  за счет усадки спрессованного эмиссионного материала на основе вольфрама с добавлением скандата бария при спекании жестко фиксируется на держателе, изготовленном токарной обработкой. С целью уменьшения технологических потерь в данной главе предлагается конструкция катода (анода) представленная на рисунке 3.1,б. Катод 1, как и в предыдущем случае фиксируется усадкой на молибденовом держателе 2, который посредством металлического припоя

припаивается к втулке из тугоплавкого материала. Для реализации такого технического решения надо провести анализ температурных профилей электрода и на основе его результатов определить материал припоя 1 (рисунок 3.1,б).

### 3.2. Научный анализ существующих результатов по исследованию температурных полей электродов.

Для выбора припоя и спаиваемых материалов необходимо прежде всего оценить рабочие температуры  $T_2$  в зоне примыкания держателя катода к втулке. Проведенный анализ литературных источников показал, что данных по величине температуры  $T_2$  немного, в то время как  $T_1$  исследована при различных токовых нагрузках довольно детально (см. таблицу 3.1).

Таблица 3.1.

Рабочие температуры конструктивных элементов электрода.

№ п/п	$L_1$ , мм	$L_2$ , мм	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	Материал катода	Литература
1	2,6	-	1350-1550	-	В5СБ	[118]
2	2,6	-	1000-1250	-	М5СБ1	[118]
3	2,6	-	1100	-	М5СБ	[118]
4	1,8	-	1650-1900	-	ВТ-50	[120]
5	1,8	-	2300- 2450	-	ВТ-15	[117]
6	10	7	1450-1950	1100	ВТ-50	[119]
7	17*	-	1950	1600	ВТ-50	[118]

Примечание: \* Электрод представляет собой круглый протяженный стержень без проточки в зоне  $L_2$ .

Анализ приведенных в таблице 1 расчетных и экспериментальных результатов позволяет сделать следующие заключения:

- Несмотря на различную протяженность катода  $L_1$ , расчетные данные работы [120] и экспериментальные результаты публикации [119] дают близкие значения температуры  $T_1$  (см. п.4 и п.6 таблицы 1) при использовании в качестве эмиссионного материала ВТ-50.

- Уменьшение диаметра электрода в зоне  $L_2$  приводит к более существенному падению температуры  $T_2$  в зоне примыкания держателя электрода (см. п.6 и п.7 таблицы 3.1);
- Использование металлокерамических катодов на основе вольфрама со скандатом бария позволяет добиться более низкой температуры  $T_1$ , чем в случае более массивного электрода из торированного вольфрама ВТ-50.

На основе приведенных рассуждений можно сделать вывод, что в случае использования металлокерамического катода при наличии уменьшенного диаметра в зоне  $L_2$  температура  $T_2$  не превысит величину 1100 °С.

Полученные данные недостаточны для формирования полноценной конструкции комбинированного электрода, обеспечивающего высокий срок службы газоразрядной лампы, в силу следующих соображений. Срок службы любой газоразрядной лампы в значительной мере зависит от теплового состояния электродов, которое, в свою очередь, определяется кроме конструктивного исполнения еще и параметрами разряда. Например, в импульсных газоразрядных лампах вследствие термических и плазменно-кинетических нагрузок на электрод происходит распыление его материала на внутреннюю поверхность оболочки, ограничивающую плазменный канал разряда [120]. В результате этого явления возрастает оптическое поглощение излучения слоем напыления, приводящее к росту градиентов температур в стенке оболочки, сдвигу границ оптической прозрачности, повышению термоупругих напряжений, следствием которых является разрушение газоразрядной лампы [8, 121].

### 3.3. Расчет и экспериментальное исследование температурного профиля электрода.

Обобщающих рекомендаций по конструированию электродов (катода и анода) газоразрядной лампы на сегодняшний день не разработано, а существующие математические модели отличаются узким кругом, оптимизируемых параметров [121 – 125] и громоздкостью вычислений [122, 124].

По этой причине, оптимальная конструкция электрода формируется в результате многочисленных и многофакторных экспериментальных исследований. Следовательно, на первом этапе наших исследований актуальной является задача сужения области поиска за счет применения эмпирического уравнения, обеспечивающего связь между размерами электрода и температурой. В данной главе сделана попытка получить такое уравнение и проверить экспериментально его правомочность.

### 3.3.1. Разработка методики и расчет продольного температурного поля электрода.

В данной главе исследовался температурный режим протяженного электрода ксеноновой газоразрядной лампы высокого давления, представляющий собой комбинацию двух цилиндров различных диаметров (рисунок 3.2 поз. 1).

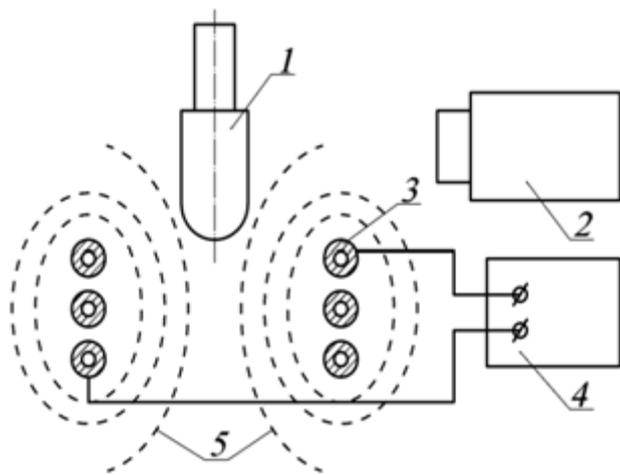


Рисунок 3.2. Блок-схема экспериментальной установки:

1 – исследуемый электрод, 2 – тепловизионная система, 3 – индуктор, 4 – ВЧ генератор, 5 – линии магнитного поля

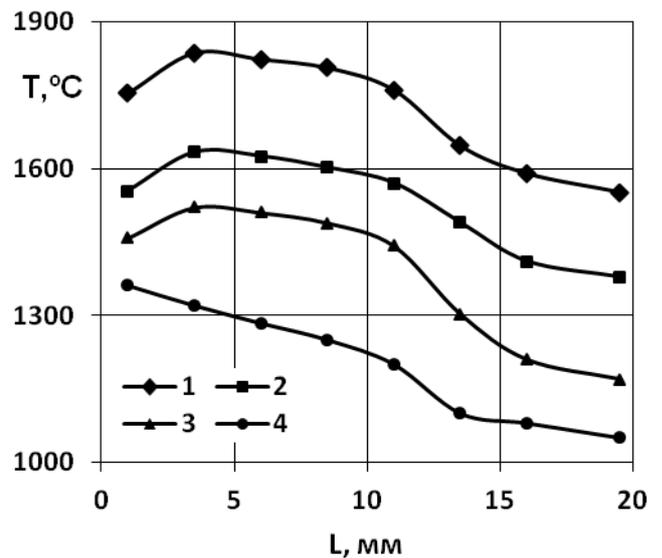


Рисунок 3.3. Температурное поле электрода при мощности ВЧ нагрева:

1 – 6,5; 2 – 5; 3 – 4 кВт, 4 – расчетная зависимость распределения температуры

По аналогии с работой [125], для каждой ступени электрода нами рассматривалось стационарное распределение температуры круглого длинного стержня,

охлаждаемого с боковой поверхности излучением по закону Стефана – Больцмана. Рабочий торец ( $z=0$ ) стержня поддерживался при постоянной температуре  $T_1$ . Задача сводилась к решению уравнения теплопроводности [125]:

$$\frac{d^2 T}{dz^2} = \frac{2\sigma\varepsilon}{\lambda R} (T^4 - T_0^4) \quad (3.1)$$

с граничными условиями:

$$T=T_1 \text{ при } z=0, \quad dT/dz \rightarrow \infty \text{ при } z \rightarrow \infty.$$

где  $T$  – температура стержня,  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стержня;  $R$  – радиус стержня;  $T_0$  – температура окружающей среды ( $T_0=300$  К).

С учетом зависимости степени черноты  $\varepsilon$  материала стержня от температуры  $T$  в виде [122]:

$$\varepsilon=Q_I \cdot T \quad (3.2)$$

решение уравнения теплопроводности (3.1) дает следующее распределение температуры вдоль длины стержневого электрода:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sqrt{\frac{8\sigma C_1}{3\lambda R} \cdot T_1^2 z}}} \quad (3.3)$$

Используя совместно уравнение (3.2) и (3.3) для стержня из вольфрама [125]  $Q_I=4,2 \cdot 10^{-4}$  град $^{-1}$ ,  $\lambda=1$  Вт/(см $^2$ ·К),  $\sigma=5,57 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см $^2$ ·К $^4$ ), получим:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4,26 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{T_1^2}{\sqrt{R}}\right) \cdot z}} \quad (3.4)$$

Температура  $T_1$  рабочего торца ( $Z=0$ ) электрода связана с мощностью  $P_1$  потока тепла в электроде соотношением [8]

$$P_1 = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \pi^2 C_1 \lambda \sigma\right)} \cdot R^{\frac{3}{2}} T_1^3 \quad (3.5)$$

Отсюда для электрода из вольфрама имеем

$$T_1^2 = 250 \frac{P_1^{1/3}}{R^{1/2}} \quad (3.6)$$

где  $T_1$  в К,  $P_1$  в Вт,  $R$  в см.

Полагая, что на рабочую часть электрода ( $R=0,3$  см) лампы мощностью 1000 Вт поступает 5% [126, 127] от мощности лампы, т.е.  $P_1=50$  Вт, из (3.6) получим  $T_1=1650$  К (1377 °С). С учетом этого значения распределение температуры по длине электрода из выражения (3.5) можно представить в виде:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1+0,21 \cdot z}} \quad (3.7)$$

где  $T$  и  $T_1$  в К,  $z$  в см. Распределение температуры из (3.7) при  $T_1=1650$  К показано на рисунке 3.3 (кривая 4).

Учитывая принятые ограничения, а именно, стационарное распределение температурного поля, можно, просчитав температуру на протяжении цилиндрической рабочей части электрода, преобразовать уравнение (3.6) для второй ступени ( $R=0,15$  см) к виду:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1+0,26 \cdot z}} \quad (3.8)$$

Таким образом, в итоге проведенных расчетных исследований нами получено температурное распределение вдоль тела электрода, представленное на рисунке 3.3 (кривая 4).

Из представленных данных видно, что на протяжении первой ступени электрода наблюдается близкая к линейной форме зависимость снижения температуры, образующая незначительный «провал» при переходе к ступени меньшего диаметра.

### 3.3.2. Разработка методики и экспериментальное исследование продольного температурного поля электрода.

Для проверки полученных расчетных результатов нами была разработана экспериментальная установка (рисунок 3.3), позволяющая смоделировать процесс

работы электрода газоразрядной лампы при тепловом воздействии плазменного канала. Суть разработанной методики состоит в воздействии ВЧ магнитного поля на торец электрода. При этом происходит нагрев только рабочей поверхности электрода. Это достигалось размещением торца электрода 1 в горизонтальной плоскости верхних витков индукционной катушки 3. В результате линии напряженности магнитного поля 5 охватывали только сферическую часть, остальные элементы экранировались от ВЧ воздействия самим телом электрода 1. Температура торцевой части электрода регулировалась мощностью нагрева индуктором 3 за счет изменения напряжения ВЧ генератора 4.

Для регистрации температуры электрода нами использован пирометрический метод измерения излучения нагретого вольфрама в спектральном диапазоне 7,5 – 14 мкм. Измерения проводились на воздухе, поэтому в применяемой тепловизионной системе SDS HotFind-LXT вводилась поправка на степень серости окисленного вольфрама. Подробно методика пирометрических измерений нами рассмотрена в работе [114].

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Распределение температуры вдоль поверхности электрода имеет два участка с зависимостями, близкими к линейным, между которыми имеется незначительный провал, соответствующий переходу с большего диаметра на меньший.

2. В зоне сферической поверхности электрода наблюдается снижение температуры, которое связано распределением напряженности магнитного поля, формируемого индуктором. Причина заключается в том, что на осевой линии индукционной катушки напряженность магнитного поля стремится к нулю. Поэтому истинная температура на поверхности сферы может быть определена аппроксимацией линейной части полученных кривых на ось ординат.

3. На цилиндрических частях электрода расчетная (кривая 4) и экспериментальные (кривые 1 – 3) зависимости качественно совпадают, что позволяет сделать вывод о правомочности полученных расчетных уравнений (3.7) и (3.8) для продольного распределения температуры.

4. Расхождение в расчетных и экспериментально измеренных значениях температур может быть ликвидировано путем приведения мощности ВЧ нагрева к реальным потерям тепла в зоне катодного и анодного пятен в газоразрядной лампе. Кроме этого, у нас вызывают сомнения малые значения мощности, идущей на нагрев электродов (до 5% [126, 127]) в ксеноновом разряде, на основе которых построен расчет распределения температуры.

Таким образом, разработанная нами расчетно-экспериментальная методика определения температурного поля электрода позволяет с достаточной точностью оценить уровень температур в зоне спаия электродного узла с оболочкой, ограничивающей разряд. Как видно из полученных графических данных (рисунок 3.3) температура рабочей поверхности электрода составляет 1300 °С, а в зоне соединения с втулкой 3 (рисунок 3.1,б) равняется около 1050 °С. Данный результат удовлетворительно согласуется с данными таблицы 3.1, что позволяет взять за основу эти результаты при выборе материала припоя и режимов пайки составного электрода.

#### 3.4. Разработка технологии изготовления комбинированного электрода газоразрядной лампы.

Во всех теоретических и экспериментальных исследованиях предполагается, что при работе газоразрядной лампы плазма контактирует со сферической поверхностью электрода (зона А на рисунке 3.1). Исходя из практического опыта эксплуатации газоразрядных ламп, можно утверждать, что это не так. Все определяется свойствами материалов, а именно работой выхода электрона, из которых изготовлен электродный узел. Возможны случаи, когда разряд, особенно в момент пробоя межэлектродного промежутка, минуя сферическую часть, концентрируется на держателе 2 или втулке 3, что неизбежно приведет к появлению в разряде паров этих металлов и, как следствие, к снижению долговечности лампы.

### 3.4.1. Теоретический анализ свойств материалов спая с позиций устойчивости к воздействию плазмы.

Выполним анализ материалов, пригодных для конструирования спая на участке  $L$  (рисунок 3.1,б), исходя из требований, определяемых функциональными особенностями газоразрядных приборов [8, 20, 126, 127]:

- Конструкционные металлы и припои должны обладать хорошими вакуумными свойствами, иметь малое газоотделение, обладать низкой упругостью паров и незначительной скоростью испарения при температурах до  $1100^{\circ}\text{C}$ . Ограничения по температурным свойствам конструкционных металлов и припоев, связанные с напылением металлов на поверхность оболочки газоразрядной лампы из-за значительных скоростей испарения, например, при эрозии электродов [128 – 131]. Поэтому упругость паров конструкционных металлов и припоев в этом случае должна быть на 1 – 2 порядка ниже разряжения в разрядном объеме лампы [123, 124, 128].

- Необходимо, чтобы температура плавления припоев  $T_{пл}$  была по меньшей мере на  $80 - 100^{\circ}\text{C}$  ниже температуры плавления спаиваемых деталей [128, 130, 131]. Это требование ограничивает выбор припоев со стороны высоких температур. В то же время температура плавления припоя не должна быть ниже  $1100^{\circ}\text{C}$ , что связано с тепловым режимом работы электрода, описанным ранее.

- Расплавы припоев должны обладать хорошей смачивающей способностью (низким краевым углом смачивания  $\theta$ ) и малой вязкостью, чтобы обеспечить быстрое затекание их в зазоры между спаиваемыми металлами [128, 130, 131].

Особым требованием, предъявляемым к материалам элементов конструкции электродного узла газоразрядной лампы, является наличие у них низких эмиссионных свойств, т.е. все применяемые металлы должны иметь работу выхода электронов  $e\phi$  больше, чем у катода на основе прессованного вольфрама с добавкой скандата бария ( $e\phi = 1,6 - 2,4$  эВ [119]) или торированного вольфрама ( $e\phi = 3,0$  эВ [117]). В противном случае разряд будет соприкасаться с элементами спая и приводить к разрушению газоразрядной лампы из-за перегрева токоввода.

В итоге проведенного анализа свойств материалов, применяемых в вакуумной технике, наиболее пригодными для получения требуемого спая являются молибден, титан и никель, используемые в элементах конструкции электрода согласно таблице 3.2.

Таблица 3.2

## Свойства материалов конструкции составного электрода

Свойства	Материал			Литература
	Mo	Ti	Ni	
Работа выхода электронов, эВ	4,3	3,95	4,5	[117, 132]
Температура плавления, °С	2630	1660	1453	[130, 132]
Температурный коэффициент расширения при температуре 1000°С, $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	11,43	11,95	20,3	[132, 20]
Давление пара при температуре 1000 °С, мм рт. ст.	$< 10^{-10}$	$< 10^{-8}$	$< 10^{-4}$	[130]
Газовыделение после термообработки при 1000°С, л·мм рт. ст./г	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	[130]
Использование материала в элементах конструкции в соответствии с рисунком 3.1,б	Держатель и втулка	Втулка или припой	Припой	-

Из таблицы 3.2 видно, что в случае никеля наблюдается значительное превышение коэффициента расширения в сравнении с остальными металлами, но данный металл обладает высокой пластичностью и применяется в виде припоя, образующего при капиллярной пайке тонкий слой, не создающий больших напряжений в спаяе. Кроме этого, согласно диаграммам состояния сплавов никеля с молибденом и титаном:

- В системе Mo – Ni образуются три стабильные промежуточные фазы MoNi, MoNi<sub>3</sub>, MoNi<sub>4</sub> и твердые растворы на основе Mo и Ni.
- В системе Ti – Ni образуются три соединения: Ti<sub>2</sub>Ni, TiNi и TiNi<sub>3</sub>.

Поэтому величина давления паров никеля над образовавшимися сплавами будет снижаться в силу правила аддитивности.

В ходе дальнейших наших исследований от использования титана в качестве материала держателя электрода и припоя пришлось отказаться, так при изготовлении импульсных ксеноновых ламп по существующей технологии в ходе огневой обработки происходит распыление титана, которое препятствует получению герметичного спая с кварцевой оболочкой и отрицательно влияет на эмиссионные свойства материала катода.

Таким образом, для окончательного выбора конструкции и разработки технологии комбинированного электрода требуется провести исследования спаев Мо с Мо посредством расплавления никелевого припоя.

### 3.4.2. Экспериментальные исследования физико-химических процессов при формировании спая элементов электрода.

Работы по разработке соединений пайкой металлов Мо – Мо никелевым припоем проводились в несколько этапов. Сначала нами было выполнено исследование краевого угла смачивания  $\theta$  расплавом никеля молибденовой пластины. Методика данного эксперимента подробно рассмотрена нами в работе [128]. Известно [134], что  $\theta$  припоев зависит от температуры и времени пайки, поэтому в этом эксперименте нами выбран режим нагрева не более 5 минут при температуре, превышающей  $T_{пл}$  никеля на 50 °С, как это рекомендуется в работах [130, 131]. После расплавления никелевой таблетки при температуре 1490 °С и выдержке в течение 3 минут в вакуумной печи СШВЭ 1.2,5/25 наблюдается высокая растекаемость припоя по поверхности молибденовой пластины. В результате расчета по формуле К. Симагоки [128] краевой угол смачивания расплавом никеля поверхности молибдена составил для  $\theta_{Ni-Mo} = 10 - 15^\circ$ .

Вторым этапом было проведение расчета величины зазора между спаиваемыми деталями (рисунок 3.1,б), исходя из уравнения высоты подъема жидкости за счет капиллярных сил (уравнения Лапласа) [131]:

$$d = \frac{2\sigma \cos \theta}{g\rho L_4}, \quad (3.9)$$

где  $L_4$ ,  $d$  – высота и ширина зазора (см. рисунок 3.1,б),  $\sigma$ ,  $\rho$  – поверхностное натяжение и плотность расплава припоя,  $\theta$  – краевой угол смачивания,  $g$  – ускорение силы тяжести. Данные по поверхностному натяжению и плотность расплава заимствованы из [134] и составили для никеля  $\sigma_{Ni} = 1735$  мН/м,  $\rho = 7,1$  г/см<sup>3</sup>. В результате вычисления по формуле (1) для высоты спаия  $L_4 = 5,0$  мм получена величина зазора  $d = 0,1$  мм.

Третьим этапом наших исследований было проведение пайки составного электрода. Для этого перед установкой собранного с катодом 1 держателя 2 (рисунок 3.1,б) в высверленную полость втулки 3 закладывался никелевый припой в виде таблетки высотой 2 мм (образец 1) или кусочка фольги толщиной 200 мкм (образец 2). Собранные электроды устанавливались вертикально катодом вверх. При этом на катоде размещался груз, обеспечивающий вытеснение расплава никеля в капиллярный зазор на высоту  $L_4$ . Режим пайки составного электрода был аналогичен указанному выше ( $T=1490$  °С, 3 минуты).

В результате проведения технологического процесса получены различные результаты пайки исследуемых образцов. В случае образца 1 наблюдалось образование вокруг держателя 2 мениска застывшего расплава на торцевой поверхности втулки 3, что связано с избыточной массой таблетки никелевого припоя и малого краевого угла смачивания. В то же время полученный нами результат позволил определить количественный состав материала образовавшегося мениска. Исследования проводились на рентгенофлуоресцентном анализаторе FISCHER-SCOPE X-RAY, зонд которого перемещался по окружности сформированного пайкой мениска. В итоге проведенных измерений выявлено два состава образовавшихся сплавов: 94,3 % Мо , 5,7 % Ni (сплав 1) и 87,5% Мо, 12,5% Ni (сплав 2). Согласно диаграмме состояния системы молибден – никель в нашем случае образовалась стабильная промежуточная фаза MoNi<sub>4</sub> (сплав 2) и твердый раствор никеля в молибдене. Учитывая тот факт, что исследуемые составы сформировались в ходе подъема расплава никеля по капиллярному зазору и постепенному растворению молибдена в никеле, то однозначного ответа о природе образовавшегося сплава на данном этапе получить не удалось. По этой причине нами были иссле-

дованы шлифы зоны продольного разреза электрода  $L_4$  (рисунок 3.1,б). Одновременно был изготовлен шлиф для образца 2, у которого выхода расплава никеля на торцевую поверхность втулки 3 не наблюдалось. В обоих случаях картина взаимодействия припоя с молибденовой втулкой и держателем электрода идентична, только в случае образца 2 не произошло полное заполнение капиллярного зазора (линия С, рисунок 3.4).

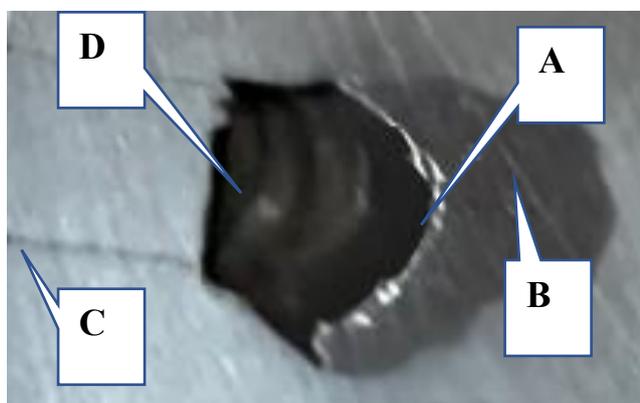


Рисунок 3.4. Микроструктура паяного соединения молибденовых элементов никелевым припоем.

Анализ приведенного на рисунке 3.4 шлифа позволяет сделать следующие заключения:

1. В нашем случае процесс пайки происходит одновременно по двум механизмам [134]:
  - Путем статического взаимодействия, когда часть расплава никеля не перемещается относительно поверхности основного металла, а в зоне спая с молибденом образуется лунка D (рисунок 3.4),
  - За счет динамического взаимодействия, когда вторая часть расплава никеля поднялась по капиллярному зазору (линия С рисунок 3.4) и образовался мениск на торцевой поверхности втулки 3 вокруг держателя 2 (рисунок 3.1).
2. При динамическом взаимодействии, как и в случае капиллярного подъема припоя, по мере растворения никеля в молибдене наблюдается образование сплавов различных составов. Например, в точке А рентгенофлуоресцентный анализ показал наличие фазы следующего состава 53,4 весовых процента молиб-

дена и 46,6 весовых процента никеля, в то время как в точке В наблюдается уже другое соотношение  $\text{Mo:Ni} = 79,9:20,1$  вес. %.

3. Наличие значительных зон взаимной растворимости никеля в молибдене требует проведения дополнительных технологических исследований, направленных на оптимизацию массы припоя.

4. Согласно диаграммы состояния системы никель – молибден, все исходные вещества и образовавшиеся сплавы обеспечивают целостность паяной конструкции при температурах ниже  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что удовлетворяет рассмотренным выше требованиям, предъявляемым к электродному узлу.

Проведенные испытания разработанной конструкции электрода в составе импульсной ксеноновой газоразрядной лампы УФ-излучения подтвердили правомочность заложенных технических решений.

Таким образом, в данной главе предложена конструкция и технология изготовления составного электродного узла газоразрядной лампы, получаемого пайкой молибденовых держателя электрода и втулки посредством расплава никеля. Преимущества предложенной конструкции и технологии заключаются в возможности повысить надежность разрядного прибора путем размещения в зоне  $L_2$  (рисунок 3.1,а) перед пайкой дополнительного высокотемпературного элемента (втулки) из электроизоляционного материала (керамика, сапфир), обеспечивающего концентрацию плазменного шнура на рабочей поверхности электрода  $L_1$  и исключая привязку разряда к конструктивным элементам в зонах  $L_2$  и  $L_3$ .

### 3.5. Разработка соединения кварцевой разрядной трубки с электродным узлом.

Сегодня в электронике получили широкое распространение технологии высокочастотной (ВЧ) индукционной пайки [135] и магнетронного напыления металлов на диэлектрики [136], которые легли в основу разработанного нами способа изготовления герметичных цилиндрических соединений кварца с колпачковыми металлическими деталями. Предлагаемая технология позволяет снизить трудоемкость, повысить надежность и воспроизводимость технологического процесса герметизации токовода импульсной лампы с кварцевой оболочкой.

### 3.5.1 Анализ существующих конструктивных и технологических решений спаев электродных узлов с кварцем.

В 70-х годах прошлого века предпринимались попытки создать для импульсных газоразрядных ламп колпачковые токовводы, соединяемые с кварцевой трубкой легкоплавкими припоями [17, 137, 138]. Несмотря на то, что было получено несколько положительных результатов, в серийном производстве газоразрядных ламп разработанная технология не нашла применения в силу низкой смачиваемости и растекаемости мягких припоев по кварцевому стеклу.

В то же время были достигнуты некоторые значимые результаты и предложено несколько важных технических решений:

1. При активной пайке кварцевого стекла с металлами необходимо использовать или активный припой, в котором одной из составляющих является активный металл, например титан, или неактивный припой, но поверхность в этом случае требуется покрывать активным металлом или его гидридом [17, 137].

2. В силу значительного различия КЛТР кварцевого стекла и металлов необходимо применять легкоплавкие мягкие припои (на основе олова, свинца, индия и др.), компенсирующие напряжения в спае за счет пластической деформации [17, 137].

3. В качестве конструкционных металлов токоподвода наиболее пригодны железоникелевые сплавы 36Н (инвар) или 29НК (ковар) [130], причем ковар имеет преимущество из-за более высокой растекаемости мягких припоев по его поверхности и образования равномерной переходной зоны при меньшей температуре (600 °С) [131].

4. Качественные герметичные спаи кварцевого стекла с коваром получены активной пайкой при использовании оловянно-титанового припоя ОТ-1,5 (ТУ 48-08-03-148-71) с содержанием Ti в основе не более 0,012 весовых процентов [26]. В то же время данный материал имеет нестабильную структуру: соотношение в основе припоя интерметаллидов, представляющих собой соединения  $Ti_6Sn_5$  ( $\gamma_1$  – фаза) и  $Ti_3Sn_5$  ( $\gamma_2$  – фаза), меняются от плавки к плавке. Так как  $\gamma_1$  – фаза об-

ладает более высокой температурой разложения, чем  $\gamma_2$  – фаза, то для пайки припоем с преобладающим содержанием  $Ti_6Sn_5$  требуется более высокое и длительное тепловое воздействие на спай. Такое явление приводит к росту термоупругих напряжений в кварцевом стекле [138].

5. Оптимальной температурой пайки припоем ОТ-1,5 является 850 °С. Увеличение до 950 °С способствует значительному взаимному растворению элементов ковара и припоя, образованию в переходном слое шириной 10 мкм интерметаллических фаз на основе соединений металлов Sn, Fe, Ti, Ni, Co, что приводит к повышенной хрупкости и высокой микротвердости (около 500 кг/мм<sup>2</sup>) в переходном слое [138].

6. В силу интенсивного взаимного растворения элементов ковара и припоя время температурного воздействия на спаиваемые детали должно быть не более 30 секунд [130]. По этой причине широко применяемая технология пайки в вакуумных печах [130] неприемлема из-за инерционности тепловых процессов. В итоге наиболее подходящим способом быстрого достижения температуры плавления ( $T_{пл.}$ ) припоя является применение индукционного нагрева [135].

7. Необходимо, чтобы рабочая температура спая колпачкового токоввода в газоразрядную лампу не превышала  $T_{пл.}$  используемых мягких припоев, т.е. должна быть ниже 250 °С. Поэтому, согласно работе [17], рассматриваемая технология активной пайки может быть применена в производстве импульсных ламп, работающих в режимах редких вспышек, когда рассеиваемая средняя электрическая мощность и температура токоввода незначительны. В случае импульсных источников УФ-излучения для оптико-электронных систем обеззараживания открытых поверхностей и окружающего воздуха [17] данное техническое требование выполняется (частота следования вспышек менее 100 Гц) и после устранения некоторых технологических трудностей может быть положено в основу серийного производства ксеноновых ламп с кварцевой оболочкой.

Остальные важные результаты работ [17, 138, 139] будут рассмотрены в ходе дальнейшего изложения.

### 3.5.2. Особенности конструкции спая и теоретические предпосылки реализации предлагаемой технологии.

Как следует из предыдущего раздела, самая большая трудность при активной пайке заключается в необходимости доставить в зону контакта расплава припоя с кварцевой оболочкой атомы титана для его химического взаимодействия с оксидом кремния. Учитывая тот факт, что чистого титана в основе припоя ОТ-1,5 всего 0,012 весовых процентов, то данная задача является достаточно сложной для воспроизводства качественного спая в серийном производстве. По нашему мнению, эту проблему можно решить путем магнетронного нанесения слоя титана на кварцевое стекло в зоне будущего соединения. Такое техническое решение нами было разработано для спаев сапфира с коваром [128, 129, 136] и освоено в серийном производстве импульсных цезиевых ламп. На рисунке 3.5 представлено конструктивное исполнение сборки разрабатываемого токоввода перед пайкой с кварцевой оболочкой 1 импульсной ксеноновой лампы.

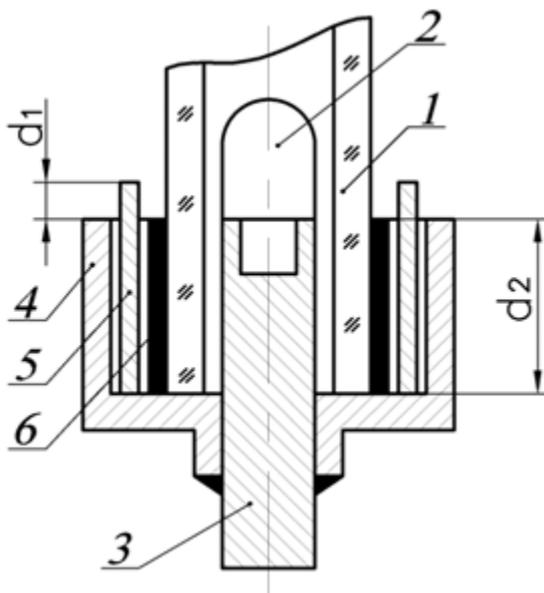


Рисунок 3.5. Конструктивное исполнение токоввода в импульсную газоразрядную лампу с кварцевой оболочкой.

1 – кварцевая оболочка, 2 – электрод, 3 – держатель электрода, 4 – коваровый колпачок, 5 – полоса припоя ОТ-1,5, 6 – слой титана,  $d_1$  – высота выступающей части припоя,  $d_2$  – длина спая.

Последовательность сборки следующая: электрод 2 механическим обжатием закрепляется на держателе 3, который затем лазерной сваркой герметично соединяется с коваровым колпачком 4.

Кварцевая оболочка 1 лампы с предварительно нанесенным слоем титана 6 вертикально устанавливается в указанную сборку, как показано на рисунке 3.1, а в образовавшийся коаксиальный зазор между коваровым колпачком 4 и слоем титана 6 размещается кольцо припоя 5. Высота выступающей части припоя  $d_1$  выбирается таким образом, чтобы при пайке расплав полностью заполнил образовавшийся при сборке зазор на высоту  $d_2$ . Избежать зазора невозможно в силу особенностей производственной сборки узла. Однако, по нашему мнению, отсутствие плотного контакта между слоем титана и припоем дает положительный эффект, который будет рассмотрен позже.

Пайка выполняется при размещении сборки токоввода в индуктор высокочастотного генератора, таким образом, чтобы середина высоты индукционной катушки совпадала с горизонтальной плоскостью, проходящей через точку  $d_2/2$  (см. рисунок 3.5). Согласно работе [135], активная удельная мощность ВЧ нагрева, выделяемая в изделии, равна:

$$P = 2,0 \cdot 10^{-4} \cdot I \cdot W^2 \cdot F \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f}$$

где  $I, f$  – ток и частота индуктора,  $W$  – число витков индуктора,  $\rho, \mu$  – удельное сопротивление и магнитная проницаемость металла,  $F$  – функция, зависящая от свойств индуктора, размеров детали и частоты тока.

Из приведенного соотношения следует, что при размещении сборки в индуктор, в установившемся режиме работы ВЧ генератора мощность нагрева каждого металла будет определяться его удельным сопротивлением  $\rho$  и магнитной проницаемостью  $\mu$ .

Так как размеры спаиваемых деталей невелики, различие в магнитной проницаемости (титан и олово – парамагнетики, ковар – ферромагнетик) существенного влияния на суммарную напряженность магнитного поля не оказывает. В ито-

ге, при воздействии ВЧ поля температура нагрева детали определяется удельным электрическим сопротивлением ее материала.

В таблицу 3.3 по данным работы [130] сведены значения удельного электрического сопротивления всех участвующих в образовании спая металлов.

Таблица 3.3

Металл	Сплав 29 НК (ковар)	Титан	Олово
$\rho$ , 10 <sup>-4</sup> , ом/см	0,5	0,42 при 20 °С 1,65 при 800 °С	0,11

Как следует из приведенных данных, в момент приложения магнитного поля в первую очередь будет осуществляться нагрев коварового колпачка и титанового слоя. Причем, по мере повышения температуры пленки титана активная удельная мощность ВЧ нагрева будет сосредоточена на нем за счет теплового роста  $\rho$  этого металла. Это важный эффект, так как в силу отсутствия плотного контакта с припоем (см. рисунок 3.5), будет происходить только реакция взаимодействия титана с кварцевым стеклом. При достижении температуры плавления припоя ( $T_{пл.} \sim 250$  °С) расплав ОТ-1,5 полностью заполнит весь объем высотой  $d_2$ . Даже в этом случае, влияния на слой титана припой не окажет, так как на его поверхности находится оксидная пленка, которая имеет высокий краевой угол смачивания  $\theta$  ( $\theta = 131 - 160^\circ$  [130]). При достижении температуры 700 °С указанная оксидная пленка растворяется в титане и начинается реакция с припоем. Таким образом, механизм формирования спая представляет собой два этапа: до 700 °С идут независимые процессы взаимодействия титана с кварцевым стеклом и жидкого припоя с коваром, а затем добавляется реакция воздействия расплава на титан.

Процессы, происходящие при пайке ковара различными припоями, подробно рассмотрены в работах [136 – 139]. В то время как изучению механизма образования переходной зоны титана с кварцевым стеклом посвящено всего несколько работ (см. библиографию публикаций [130, 137]). По нашему мнению, наиболее вероятен процесс формирования спая титана с кварцем, предложенный на основе рентгенофазового исследования взаимодействия Ti с SiO<sub>2</sub> в работе [140]. По мне-

нию авторов, начиная с температуры 500 °С, титан восстанавливает оксид кремния, отнимая у него кислород и растворяет его в своей кристаллической решетке. При этом  $\text{SiO}_2$  полностью восстанавливается до Si, который реагируя с титаном образует силицид  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ . По мере повышения температуры до 950 °С увеличивается активность взаимодействия Ti с  $\text{SiO}_2$ , что ведет к увеличению степени окисления титана и к росту количества образовавшегося  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ . Тот факт, что при взаимодействии Ti –  $\text{SiO}_2$  наряду с твердым раствором кислорода в титане образуется силицид, находится в полном соответствии со слабой растворимостью Si в  $\alpha$  – Ti (0,09 весовых процентов при комнатной температуре и 0,31 – 0,54 в интервале температур 750 – 860 °С [140]). Образование  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  и твердого раствора кислорода в титане свидетельствует о раздельном взаимодействии Ti с кремнием и кислородом при формировании переходной зоны в спае.

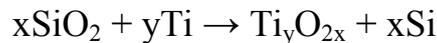
Механизм взаимодействия припоя ОТ-1,5 с титаном частично нами описан выше при рассмотрении ранее разработанной технологии пайки кварцевых оболочек импульсных ламп. В соответствии с известной диаграммой состояния олово – титан сплавы, содержащие до 8,3 весовых процентов титана, имеют фазовое превращение эвтектического типа при температуре 231 °С, в результате которого образуется твердый раствор титана в олове и  $\gamma_2$  – фаза ( $\text{Ti}_3\text{Sn}_5$ ). При увеличении содержания титана от 8,3 до 34,6 весовых процентов в сплавах появляется второе фазовое превращение при температуре 790 °С, природа которого не установлена. В то же время в работе [138] доказано, что при указанной температуре происходит превращение  $\gamma_2$  – фазы в  $\gamma_1$  – фазу ( $\text{Ti}_6\text{Sn}_5$ ).

Таким образом, на основе выполненного нами литературного анализа и приведенных теоретических доводов, можно предположить, что предлагаемая технология пайки кварцевого стекла с предварительно нанесенным слоем титана посредством расплава припоя ОТ-1,5 гарантировано обеспечит надежность коварового токоввода колпачкового типа.

### 3.5.3. Термодинамический анализ взаимодействия материалов спая.

Рассмотрение термодинамики взаимодействия веществ, входящих в конструкцию спая, в условиях пайки очень важно, так как результаты определяют возможность протекания той или иной химической реакции. Достоинство термодинамических расчетов заключается в том, что можно рассчитать тепловой баланс, используя справочные данные, а затем определить разрешимость того или иного процесса. Как следует из предыдущего изложения, основные возникающие проблемы при пайке связаны с взаимодействием титанового покрытия с кварцем и припоями.

Рассмотрим прямую реакцию восстановления кварца ( $\text{SiO}_2$ ) титаном:



где  $\text{Ti}_y\text{O}_{2x}$  – оксиды титана:  $\text{TiO}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  и  $\text{TiO}_2$ . На рисунке 3.6 изображены температурные зависимости стандартной энергии Гиббса образования ( $\Delta_f G^0_T$ ) оксида кремния (кварц) и оксидов титана в пересчете на 1 моль  $\text{O}_2$  по данным монографии [141]. Так как стандартная энергия Гиббса образования оксидов титана имеет более отрицательные значения, чем для оксида кремния, то при высоких температурах реакция восстановления кварцевого стекла титаном энергетически

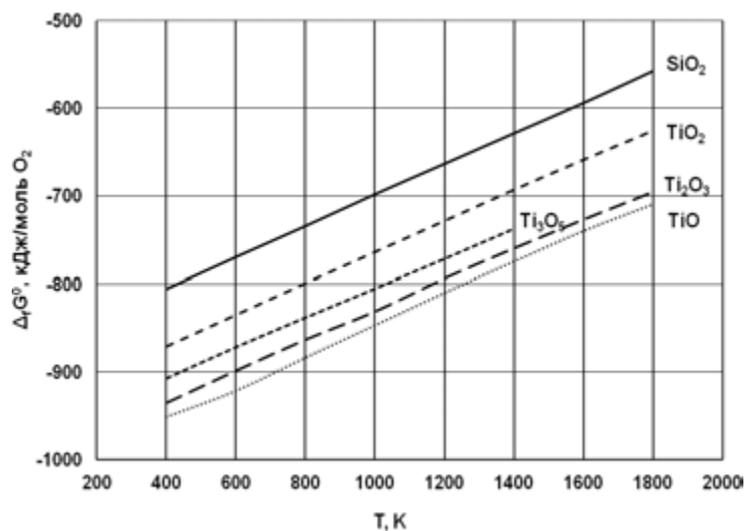
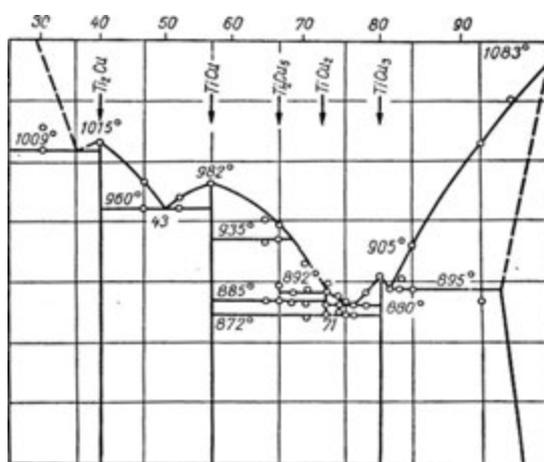


Рисунок 3.6. Температурная зависимость энергии Гиббса образования оксидов кремния и титана

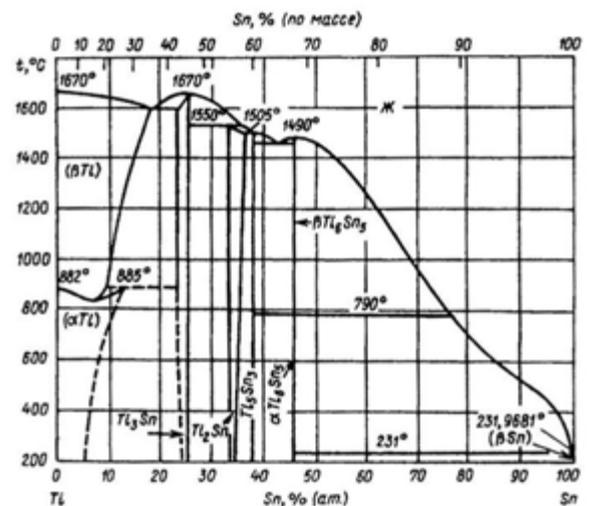
выгодна. Причем, чем ниже степень окисления полученного оксида титана, тем более вероятна реакция его образования.

По данным работы [142] оксиды  $Ti_2O_3$  и  $TiO_2$  не образуют соединений и практически не смешиваются с  $SiO_2$  даже в расплавленном состоянии. Поэтому наиболее вероятными продуктами реакции металлического титана с кварцем будет смесь кремния с оксидами титана.

В качестве легкоплавких припоев используются сплавы олова с медью и индием [17, 137, 138]. Поэтому проанализируем их взаимодействие с титаном. Диаграмма состояния медь – титан (рисунок 3.7,а) взята из работы [31]. В системе присутствуют 6 соединений. Наиболее устойчивые среди них  $CuTi$  и  $CuTi_2$  конгруэнтно плавятся при 984 и 1010 °С.



а)



б)

Рисунок 3.7. Диаграммы состояния Cu – Ti (а) и Sn – Ti (б)

Растворимость титана в меди в зависимости от температуры приведена в таблице:

T, °C	600	700	800	850	900	950
$x_{Ti}$ , ат. %	2,5	3	5,5	7,5	8	6,5

Как видно из приведенных данных растворение незначительно, даже при повышении температуры. В то время как в системе олово – титан [143] выявлено наличие 4-х соединений. Данные о растворимости титана в олове сведены в таблицу:

$T, ^\circ\text{C}$	320	515	810	880
$x_{\text{Ti}}, \text{ ат. \%}$	3,6	6,1	18,4	21,6

В данном случае образование соединений гораздо выше, что послужило основным доводом использования олова в качестве основного компонента припоя.

В случае применения пластичного индия ситуация сложнее. Титан в индии (рисунок 3.8), при температурах ниже  $796^\circ\text{C}$  растворяется с образованием  $\text{Ti}_3\text{In}_4$  [143]. Выше этой температуры, это соединение разлагается, по-видимому, на  $\text{Ti}_3\text{In}$  и  $\text{In}_{(\text{ж})}$ .

Поэтому использование олова в качестве преобладающего компонента припоев нами принято правильно и взято за основу в разрабатываемой технологии.

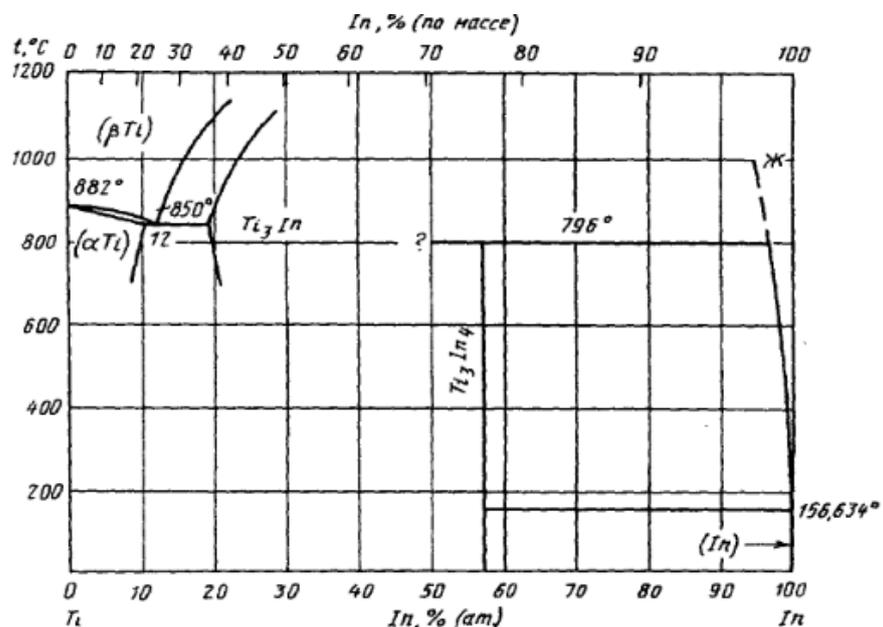


Рисунок 3.8. Диаграмма состояния In – Ti.

### 3.5.4. Исследование химического взаимодействия в процессе формирования спая.

Прежде чем исследовать процессы формирования спая в целом, необходимо изучить взаимодействие контактирующих материалов между собой. Понятно, что в ходе расплавления припоя ОТ-1,5 он будет смачивать и распределяться (растекаться) по поверхностям спаиваемых деталей (ковар и слой титана). Известно, что на растекаемость влияют такие факторы, как жидкотекучесть, вязкость, поверхностное натяжение, характер взаимодействия жидкого и твердого металлов и др. При соединении детали пайкой желательнее, чтобы коэффициент растекаемости  $K_p$  был не более 0,5. Указанное значение соответствует углу краевого смачивания около  $40^\circ$  [131].

Коэффициент растекаемости определяется по формуле [145]:

$$K_p = \frac{S_0}{S_1}$$

где  $S_0$ ,  $S_1$  – площадь капли припоя до и после расплавления, соответственно.

Для определения растекаемости припоя (содержание титана 2 %) из лент толщиной 0,7 мм вырезались образцы диаметром 8 мм, которые предварительно обрабатывались в соответствии с принятой технологией подготовки деталей к пайке.

Дополнительно нами было проведено исследование растекаемости припоя ОТ-1,5 по кварцевой пластинке. Целью данного эксперимента являлась необходимость исключить снижение процента выхода годных изделий в случае нарушения сплошности титанового покрытия (царапин, пятен и т.д.) при сборке токоввода. На таких дефектных участках должна происходить реакция входящего в состав припоя ОТ-1,5 титана непосредственно с кварцем, по механизму, описанному в работах [138, 143, 144].

Полученные результаты исследований в диапазоне температур 750 – 850 °С приведены на рисунке 3.9.

Из представленных данных следует:

- Коэффициент растекаемости припоя по поверхности сплава 29НК остается практически неизменным ( $K_p = 0,38 - 0,44$ ).

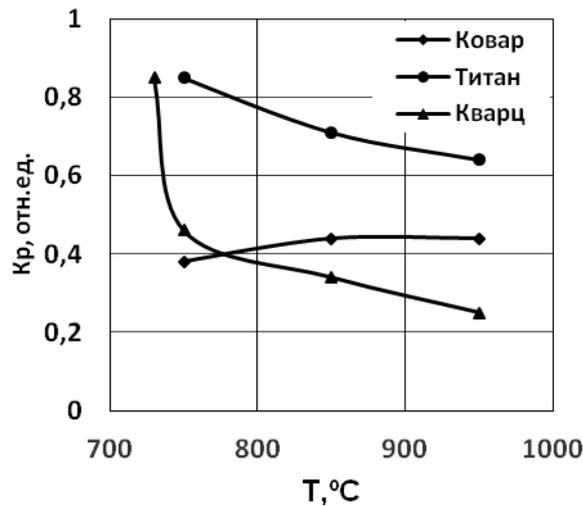


Рисунок 3.9. Температурная зависимость растекаемости припоя OT-1,5 по материалам элементов спая.

- На титановой поверхности расплав OT-1,5 по мере повышения температуры нагрева распределяется незначительно ( $K_p$  снижается от 0,85 до 0,61). Данные результаты подтверждают правомочность предложенного выше механизма формирования спая, т.е. в первую очередь происходит смачивание коваровой детали, а затем по мере заполнения зазора расплавом OT-1,5 начинается его взаимодействие со слоем титана. За счет образовавшегося временного интервала нерастворенный титан успевает вступить в реакцию с кварцевым стеклом.

- В результате проведенных исследований нами выявлено, что на кварцевом стекле при повышении температуры нагрева от 730 до 850 °C коэффициент растекаемости припоя довольно быстро уменьшается от 0,85 до 0,4. Видимо по этой причине температура 850 °C выбрана в качестве оптимальной при пайках, проводимых авторами работ [145, 146].

Объяснение полученной температурной зависимости  $K_p$  для различных припоев по материалам спаев дано в монографии [130], из которой следует, что материалы с неметаллической связью (в нашем случае  $\text{SiO}_2$ ) препятствуют растекаемости жидких металлов, так как они обладают низкой свободной энергией  $\Delta G$ .

Поэтому нагрев кварцевого стекла способствует росту  $\Delta G$  и снижению  $K_p$  припоя. Возможно, по этой же причине происходит незначительный рост смачивания припоем окисленной пленки титана на поверхности кварцевого стекла.

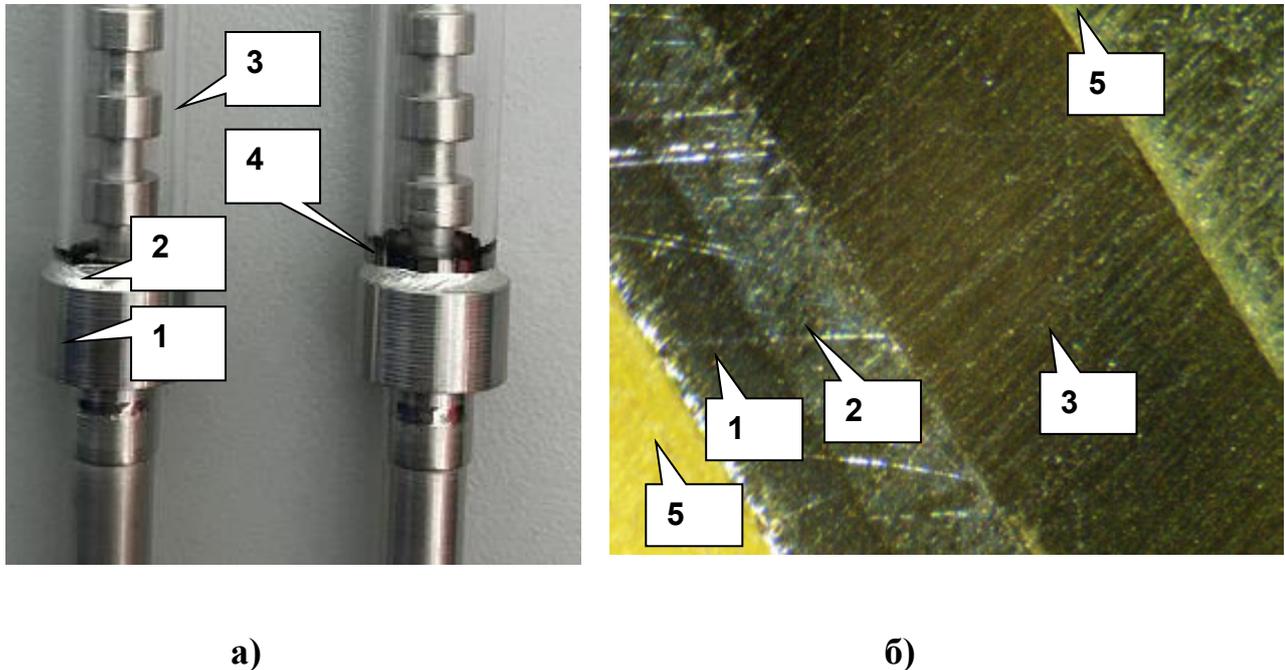


Рисунок 3.10. Фото разработанного спая в составе газоразрядной лампы (а) и микроструктура соединения кварца со сплавом 29НК.

1 – ковар; 2 – припой ОТ-1,5; 3 – кварцевое стекло; 4 – титановое покрытие; 5 – заливочный состав (эпоксидная смола).

Дальнейшие наши исследования были направлены на получение цилиндрического спая токоввода U-образного газоразрядного источника УФ-излучения. Сборка электродного узла, фрагмент которого приведен на рисунке 3.10,а, производилась по схеме, показанной на рисунке 3.5. На концевую часть кварцевой оболочки предварительно наносился магнетронным напылением (см. рисунок 3.10,а) слой титана 4 толщиной 0,7 – 0,8 мкм. Затем производилась сборка кварцевой оболочки и коварового колпачка. В образовавшийся зазор между деталями 1 и 4 (рисунок 3.5) размещался припой ОТ-1,5 в виде кольца толщиной 0,35 мм. Далее полученная сборка располагалась в вакуумированном резервуаре и в зоне  $d_2$  (рисунок 3.5) производился ВЧ-нагрев в течение 1 – 2 минут с момента начала плав-

ления ОТ-1,5 до образования равномерного мениска припоя 2 (рисунок 3.10,а). После завершения пайки и остывания лампы производилась проверка герметичности спаев на гелиевом течеискателе Phoenix L300i (Leybold GmbH, Германия).

Для анализа микроструктуры сформировавшихся слоев, образующих спай, нами был изготовлен шлиф продольного разреза соединения, который представлен на рисунке 3.10,б. Из полученных результатов видно, что между коваровой деталью 1 и оловянно-титановым припоем имеется незначительная переходная зона, связанная с проникновением расплава припоя по границам зерен коваровой детали [131]. В то время как титановый слой полностью растворился в расплаве ОТ-1,5 с образованием четкой границы между припоем 2 и кварцевым стеклом 3 (рисунок 3.10,б). К сожалению, приборная оснащенность наших исследований не позволила определить наличие силицида титана в зоне границы, но пирометрический контроль температуры коварового колпачка показал температуру 850 °С, что позволяет предположить, что в соответствии с работой [140], он должен образоваться.

На завершающем этапе исследований нами проведены испытания импульсной ксеноновой газоразрядной лампы с разработанными колпачковыми токовводами в эксплуатационных режимах работы установок обеззараживания. Полученные результаты подтвердили работоспособность токоввода источника УФ-излучения и правомочность разработанных технических и технологических решений.

## ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Эффективность использования в оптико-электронной системе газоразрядной лампы определяется ее возможностью обеспечивать эксплуатационные характеристики (энергетическую экспозицию излучения в УФ-диапазоне, пусковые параметры, предельные механические и электрические нагрузки и т.д.) в течение требуемого срока службы изделия. На сегодняшний день в серийном производстве освоена импульсная ксеноновая лампа с U-образным плазменным каналом типа ФК-22/150 с использованием фольгового токоввода (см. раздел 1.3). Целью данной главы является посредством сопоставления параметров разработанного импульсного УФ-источника и серийного образца, выявить достигнутые преимущества и полученные недостатки, а также провести дополнительные исследования характеристик, к которым ранее разработчики не проявили научного интереса.

### 4.1. Процессы формирования плазменного канала при выходе импульсной лампы в номинальный режим работы.

Вопрос о готовности лампы к обеспечению номинальных эксплуатационных характеристик, в частности максимальной энергетической экспозиции в УФ-диапазоне, имеет важное значение при разработке источников излучения для оптико-электронных систем обеззараживания воздуха и поверхностей. Суть проблемы заключается в том, что с момента прохождения первого импульса разрядного тока каждая последующая вспышка происходит в условиях сформированных предыдущими импульсами (температурный профиль рабочей среды после остывания плазмы, давление инертного газа, остаточная ионизация, тепловое поле электродов и т.д.). В разработанной лампе из-за наличия заэлектродных объемов указанные явления дополняются градиентом давления по длине лампы.

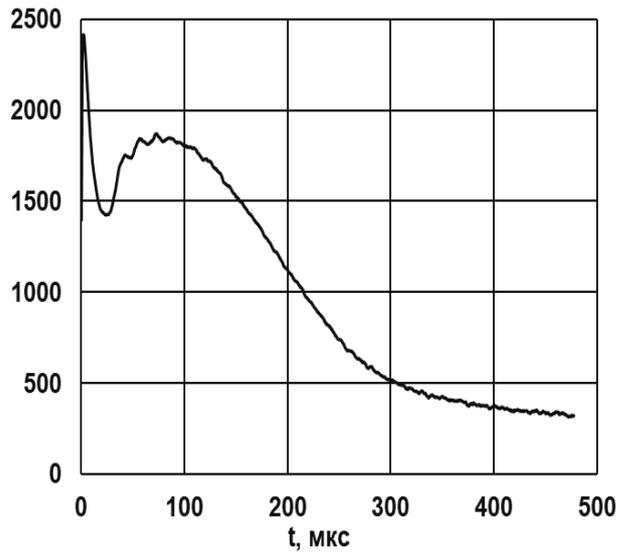


Рисунок 4.1. Осциллограмма импульса напряжения на разрабатываемой лампе.

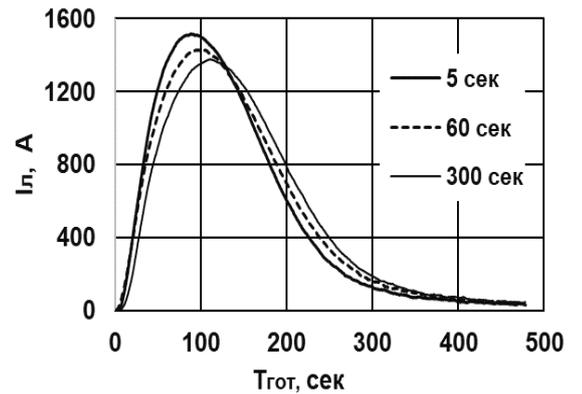


Рисунок 4.2. Осциллограммы импульсов тока в процессе выхода разрабатываемой лампы в номинальный режим

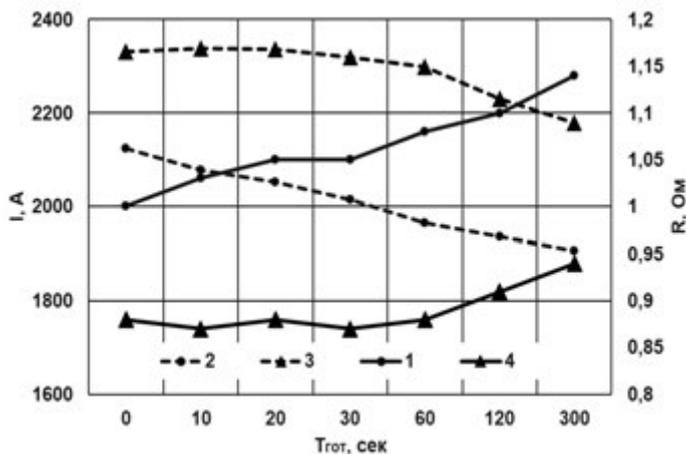


Рисунок 4.3. временная зависимость пикового значения тока (2,3) и сопротивления (1,4) в квазистационарной стадии разряда серийной (3,4) и разработанной лампы в процессе выхода в номинальный режим

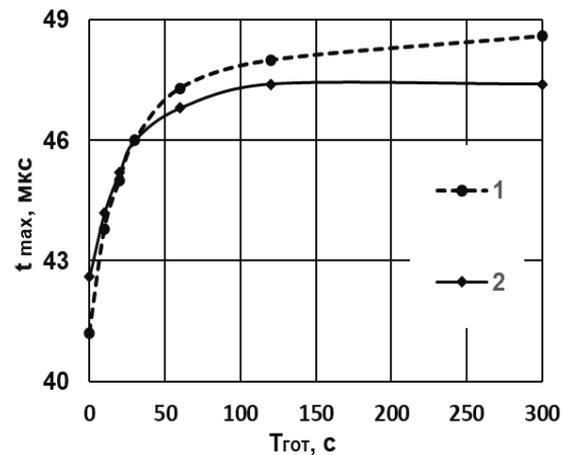


Рисунок 4.4. Время достижения квазистационарного состояния ксеноновой плазмы при выходе в номинальный режим работы экспериментальной (1) и серийной (2) ламп.

Подробно вопросы первичного нарастания тока до расширения канала рассмотрены в разделе 2.1 монографии [8]. В данной работе отмечается, что при формировании стримера явления в плазме характеризуются множеством быстро меняющихся во времени взаимосвязанных характеристик, таких как радиальное распределение величин концентрированного канала (температура, плотность газа, степень ионизации т.д.), расход энергии в окружающее пространство (излучение, газодинамические процессы, теплопроводность), а также продольная напряженность электрического поля и приэлектродные падения напряжения.

В нашем случае при первичном разряде накопительного конденсатора, заряженного до напряжения 2500 В (рисунок 4.1) происходит форсированная ионизация межэлектродного промежутка, при этом время достижения максимума тока (рисунок 4.3.) при  $T_{zom}=5$  сек. составляет порядка 43,5 мкс (рисунок 4.4). Дальнейшие разрядные импульсы способствует повышению температуры плазмы, исходя из остаточного тепла и нового разогрева, что сказывается на повышении среднего давления плазмообразующей среды, падении пикового значения тока (рисунок 4.3) и, как следствие к росту сопротивления газоразрядной лампы (рисунок 4.3). При этом скорость нарастания тока имеет аномальный характер (рисунок 4.4), т.е. при истечении 30 сек. в случае серийной лампы и 60 сек. для разрабатываемого источника излучения наблюдается резкое снижение времени достижения квазистационарной стадии разряда.

На рисунке 4.2 представленные осциллограммы импульсов тока показывают, что по мере повышения средней температуры разряда происходит снижение плотности тока, при этом, как нами показано в разделе 2.3.2,  $j_l$  снижается для всех соотношений  $V_z/V_p$  по идентичному закону (рисунок 2.10). С момента зажигания разряда до выхода в номинальный режим работы импульсной ксеноновой лампы при увеличении соотношения наблюдается различные падения плотности тока в разряде, например, для  $V_z/V_p=0,15$   $j_l$  снижается на 7%, в то время как для  $V_z/V_p=0,3$  эта величина достигает 9%. Данное явление связано с процессом установления газодинамического равновесия (см. уравнения (2.19) и (2.20)).

Срок службы является одним из важнейших параметров импульсного источника УФ-излучения, который также связан с условиями выхода газоразрядной лампы в номинальный режим работы. Проблема заключается в том, данный параметр определяется возможностью обеспечивать газовым разрядом энергетическую экспозицию  $W_u$  в УФ-диапазоне на требуемом уровне. Уменьшению энергии излучения способствует неизбежное снижение прозрачности из-за налетов распыляемого материала электродов, образуемых на внутренней поверхности разрядной трубки. Эрозия электрода, в свою очередь, определяется скоростью достижения оптимальной рабочей температуры, обеспечивающей устойчивую эмиссию и отсутствие катодного пятна. В частности, для применяемого в нашем случае в качестве эмиссионного материала скандата бария оптимальной температурой является 1100 °С (таблица 3.1 [119]). Для установления времени достижения оптимальной температуры электродом нами были изготовлены экспериментальные импульсные ксеноновые лампы (рисунок 4.5) с полым держателем 3 электродов 2. Как видно из рисунка 4.5. используемая нами хромель-алюмелевая термопара 4 непосредственно контактирует с электродом 2, что позволяет милливольтметрами 6 контролировать напряжение термоэдс. Дальнейший расчет температуры производился по справочным данным монографии [147]. Для обеспечения плотного контакта термопары с торцевой частью электрода использовался специальный пружинящий элемент, изготовленный из вакуумной резины.

Контроль показаний милливольтметров осуществлялся через каждые 10 сек. вплоть до стабилизации температуры электродов. Как видно из представленных на рисунке 4.6 данных температура обеих электродов на начальном этапе возрастает по закону близкому к линейному. При этом с момента зажигания разряда температура катода ниже, чем у анода. Далее, по мере прогрева лампы, при достижении 60 сек. температуры сравниваются, после чего тенденция роста меняется на противоположную, т.е температура катода становится выше, чем у анода.

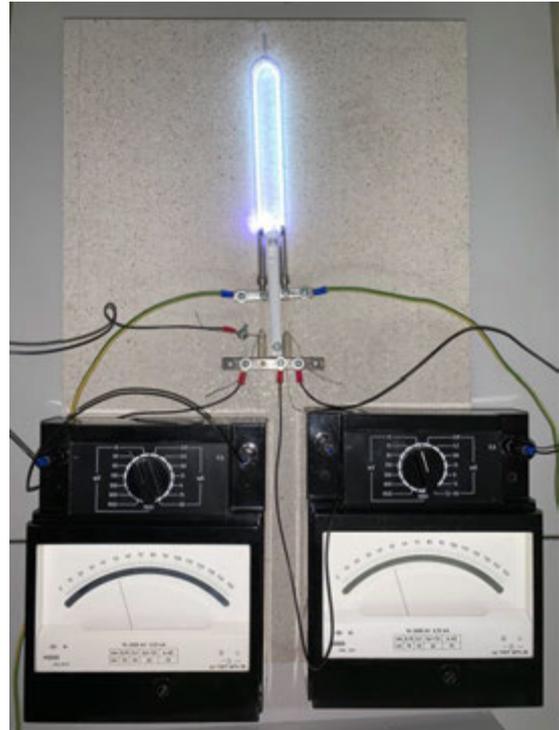
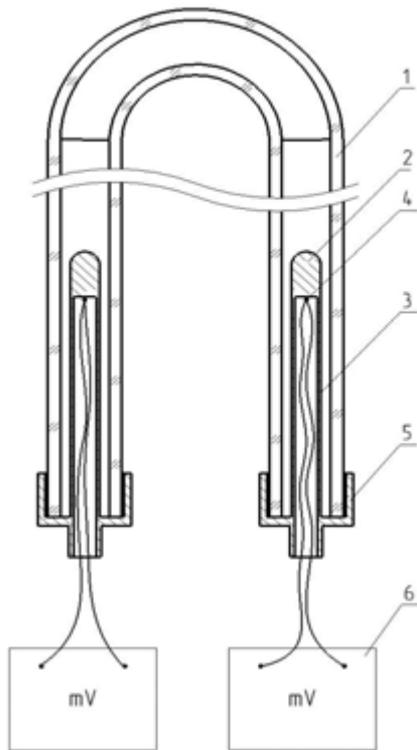


Рисунок 4.5. Блок-схема и фото экспериментальной установки о определению температуры электродов разрабатываемой лампы.

1 – разрядная оболочка лампы, 2 – электрод, 3 – полый токоввод, 4 – контакт термопары, 5 – колпачковый герметизирующий элемент, 6 – милливольтметр.

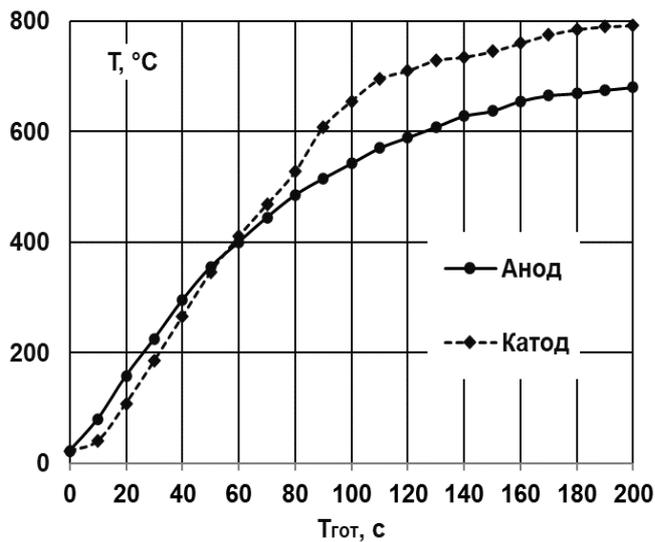


Рисунок 4.6. Температура торца электрода в процессе выхода в номинальный режим работы экспериментальной лампы.

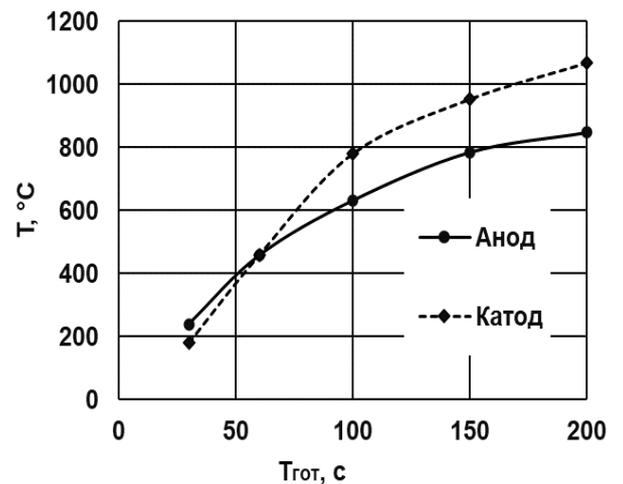


Рисунок 4.7. Расчетная температура рабочей части электрода в процессе выхода в номинальный режим работы экспериментальной лампы

Данные результаты можно, оценивать как качественные, так как установления теплового баланса электрода в результате теплопроводности зависит от конструкции электрода, теплоемкости материала, контактирующей оболочки, условий теплосъема и т.д. В то же время, наблюдаемое отставание в нагреве катода от анода имеет определенный смысл, так как перечисленные условия эксплуатации у обоих электродов идентичны.

Для пересчета измеренной температуры к рабочей температуре поверхности электрода было преобразовано уравнение (3.8) к следующему виду:

$$T_1 = \frac{T}{\sqrt{1 - 4,26 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{T^2}{\sqrt{R}} \cdot z}} \quad 4.1$$

где  $T_1$  и  $T$  – температуры рабочей поверхности и торцевой части электрода в зоне контакта с термопарой,  $R$  – радиус электрода.  $z$  – длина электрода.

Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 4.6, а расчетная температура поверхности электрода посредством пересчета по уравнению 4.1 приведена на рисунке 4.7. Как видно из представленных данных температура катода достигает величины 1100 °С по истечении более 3 минут. Учитывая перечисленные ограничения, то время установления электродом стационарного режима имеет более короткую длительность.

Таким образом, стабилизация практически всех параметров плазмы и тепловых режимов электродов происходит в течение 3 минут, и как следствие, максимальная эффективность газового разряда будет достигнута по истечении этого времени.

#### 4.2. Пространственное распределение излучения лампы

Согласно работам [1, 2, 7] эффективность обеззараживания во многом зависит от равномерности облученности окружающих поверхностей, поэтому изуче-

ние влияния конфигурации плазменного столба на распределение в пространстве УФ-излучения (индикатрисы) является актуальной задачей.

#### 4.2.1 Теоретический анализ факторов, определяющих пространственное распределение излучения газоразрядной лампы.

Изучению индикатрис импульсных ксеноновых ламп посвящено ограниченное количество публикаций [8, 38 – 40]. При этом в большинстве указанных работ исследования проводились в видимом диапазоне спектра, что обусловлено основным применением импульсного ксенонового разряда в качестве источника накачки активных сред лазеров на основе АИГ:Nd<sup>+3</sup> с полосой поглощения в диапазоне длин волн 500 – 900 нм [4.1]. Исключением является работа [38], в которой подробно рассматриваются характеристики излучения дуговых трубчатых ксеноновых ламп переменного тока в спектральном диапазоне 185 – 4500 нм, предназначенных для промышленного освещения. В связи с появлением новых сфер применения газового разряда (УФ обеззараживание, ИК помехи и т.д.) возникла необходимость исследований индикатрис в УФ и ИК области оптического спектра. Поэтому вначале рассмотрим некоторые особенности импульсного ксенонового разряда с позиций влияния на пространственное распространение излучения газоразрядной лампы, а затем проанализируем полученные нами индикатрисы импульсных ксеноновых ламп U-образной конфигурации.

Во-первых, форма индикатрисы определяется конструкцией лампы. При выходе излучения из плазмы равномерному распределению его в пространстве препятствуют электроды газоразрядной лампы, которые частично затевают и, соответственно, поглощают некоторую долю энергетического потока. Одновременно различная конфигурация плазменного канала (прямая, спиральная, U-образная) вносит изменения в форму индикатрисы за счет сложного конструктивного исполнения и воздействия собственного излучения на близко расположенные соседние участки разряда.

Во-вторых, импульсный режим работы лампы предполагает наличие в плазме таких явлений как контракция разрядного канала по оси или вдоль стенки,

конвекция при различных пространственных положениях, что создает неравномерность распределения яркости источника излучения.

В-третьих, ксеноновая плазма в импульсных лампах ограничена кварцевой оболочкой, которая влияет на пространственное распределение путем частичного поглощения стенкой радиационного потока, френелевского отражения излучения от внутренней и внешней поверхностей разрядной трубки. Отражение излучения обратно в плазму приводит к частичной поляризации выходящего излучения [40].

В-четвертых, значительное влияние на пространственное распределение потока излучения газоразрядной лампы оказывает коэффициент поглощения плазмообразующей среды  $k_\lambda$ . В случае импульсного ксенонового разряда  $k_\nu$  сложным образом зависит от длины волны и удельных электрических нагрузок на кварцевую оболочку. Данный вопрос подробно обсуждался в предыдущих разделах.

В-пятых, согласно монографии [8] в жестких энергетических режимах эксплуатации наблюдается испарение граничащей с ксеноновой плазмой поверхности кварца, что способствует введению в состав плазмообразующей среды паров кремния. Влияние продуктов эрозии кварцевой оболочки на коэффициент поглощения ксеноновой плазмы различен. При низких температурах, соответствующих режимам с большой длительностью импульса (более  $10^{-3}$  с) продукты испарения кварца увеличивают почти вдвое коэффициент поглощения в спектральных областях 1500 – 3000, 350 – 750 нм, в 5 раз в области 200 – 250 нм, в 10 раз на участке 150 – 200 нм. Возрастание  $k_\nu$  в УФ области приводит к росту лучистого потока в этой спектральной области и, как следствие, увеличению потерь на стенках [27, 83].

Из всего сказанного следует, что газоразрядная лампа с определенной конфигурацией плазменного канала при работе в разрядном контуре будет иметь свое фиксированное пространственное распределение излучения, характерное для применяемого электрического режима работы, состава, давления и коэффициента поглощения плазмообразующей среды, требуемого спектрального интервала длин волн.

#### 4.2.2. Методика исследования индикатрис излучения импульсных газоразрядных ламп.

При разработке методики исследований важно отметить временной аспект формирования плазменного канала при прохождении импульса тока. Индикатриса излучения импульсных ламп определяется формой и продольным и радиальным распределением яркости светящего разрядного столба. В импульсных лампах распределение яркости плазмы непрерывно меняется в течение прохождения импульса тока и стабилизируется при достижении квазистационарной стадии разряда [8]. По этим причинам непрерывно меняется и пространственное распределение излучения. Однако эти изменения незначительны, следовательно, для практических целей можно рассматривать пространственное распределение интегральных фотометрических параметров в различных спектральных интервалах, где показатель поглощения плазмы примерно одинаков при достижении разрядом квазистационарного состояния.

В наших исследованиях измерение индикатрисы в относительных единицах проводилось посредством горизонтального поворотного стола с шагом  $10^\circ$  (рисунок 4.1). При всех измерениях горизонтальная ось фотоприемников 2 и 3 (для большей информативности методики на рисунке приемники показаны с небольшим смещением) пересекала центр разрядного промежутка исследуемых ламп. Сигнал с приемных устройств регистрировался осциллографом Tektronix TDS 2024B.

Расчетная точка на индикатрисе получалась путем усреднения не менее трех измерений пиковой силы ИК излучения или энергетической экспозиции в УФ-диапазоне. В наших исследованиях были задействованы следующие приемники излучения:

- Для УФ-диапазона - фотоэлектрический приемник излучения на основе фотодиода SGlux SG01D-C18 со спектральной чувствительностью в диапазоне 0,24 – 0,28 мкм с максимумом на длине волны 0,25 мкм.
- Для среднего ИК диапазона - охлаждаемый фоторезистор типа ФСГ со спектральным диапазоном чувствительности 2,0 – 5,0 мкм с максимумом на 4,3 мкм.

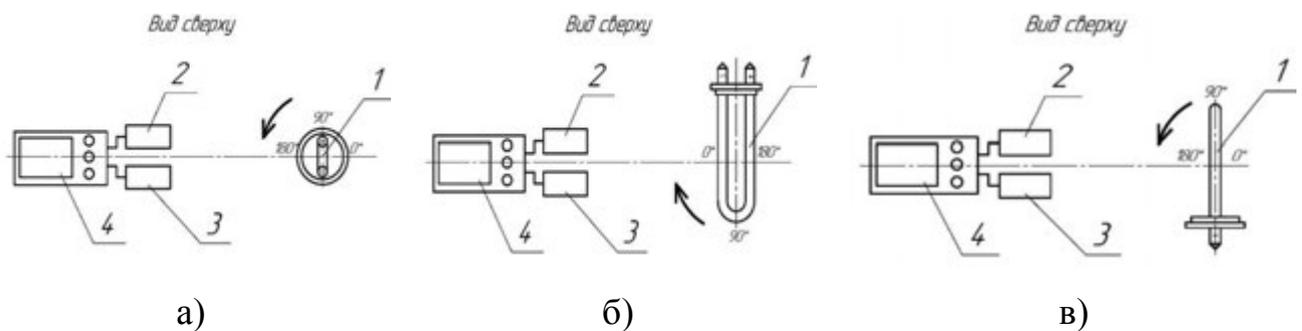


Рисунок 4.8. Блок схемы экспериментальных исследований индикатрис излучения импульсных ксеноновых ламп с U-образной конфигурацией плазменного канала.

1 – исследуемая лампа, 2, 3 – фотоприемные устройства, 4 – осциллограф.

В качестве источника излучения нами использовались экспериментальные образцы импульсных ксеноновых ламп с U-образной конфигурацией разрядной дуги. Исследуемая газоразрядная лампа имела диаметр разрядного промежутка 7 мм и межэлектродное расстояние 300 мм. Энергия импульса при испытаниях составляла 200 Дж при  $P_{уд} = 16 \text{ Вт/см}^2$ . Особенности конструкции и условий эксплуатации приведены в работах [3, 4].

Другие методологические особенности исследований нами будут рассмотрены в ходе дальнейшего изложения и обсуждения полученных результатов.

#### 4.2.3. Исследование индикатрисы импульсной ксеноновой лампы с U-образной конфигурацией разрядной дуги.

Сложность исследования данной конструкции импульсной ксеноновой лампы связана с наличием специального цоколя, закрепляющим токовводы в строго

фиксированном положении и обеспечивающим присоединение к установке. Несмотря на то, что конструктивное исполнение лампы позволяет провести испытание при углах поворота до  $300^\circ$ , мы ограничились диапазоном  $0^\circ - 180^\circ$ , исходя из предположения, что в неисследованных направлениях пространственное распределение излучения будет близко к индикатрисе, показанной на рисунке 2, в интервале углов  $60^\circ - 90^\circ$ .

Вторая трудность наших исследований заключалась в том, что пространственных положений двух параллельных частей плазменного канала U-образной конфигурации по отношению к направлению на приемное окно фотоприемника может быть неограниченное количество. По этой причине в своих исследованиях мы выбрали три основных исходных положения импульсной лампы (рисунок 4.8), которые частично перекрывают весь диапазон возможных вариаций поворотов плазменного столба.

На рисунке 4.9 приведены полученные нами результаты.

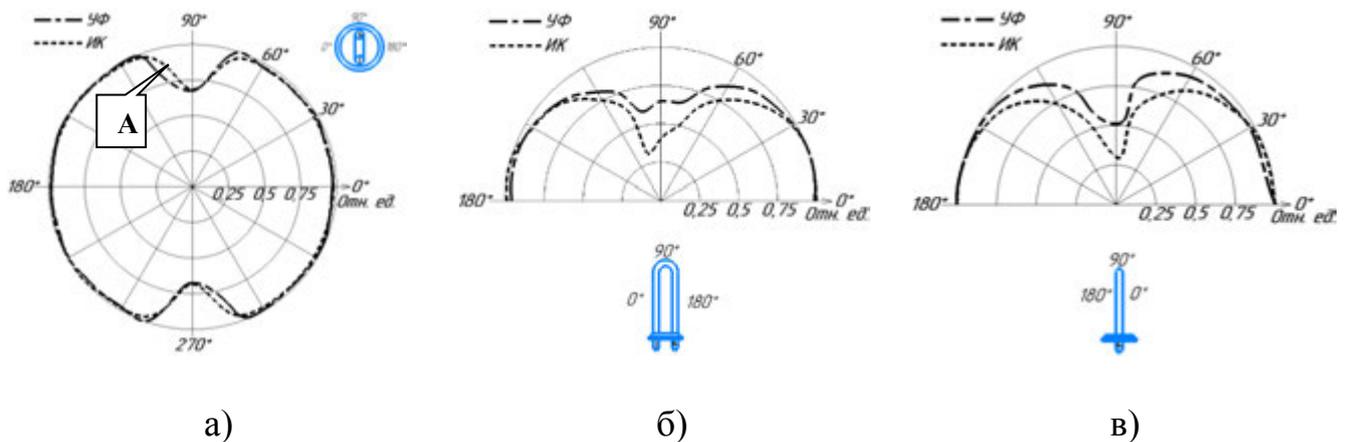


Рисунок 4.9. Индикатрисы излучения в различных плоскостях согласно рисунку 4.8.

Из представленных на рисунке 4.9 данных можно сделать следующие заключения:

1. Измерения при повороте газоразрядной лампы U-образной конфигурации вокруг своей оси (рисунок 4.8,б) подтверждают данные монографии [8] о практически равномерном распределении излучения плазменного канала в про-

странстве. Наблюдаемые провалы с максимумом при  $90^\circ$  и  $270^\circ$  (рисунок 4.9,а) обусловлены совмещением двух частей плазменного канала в направлении визирования фотоприемного устройства. По этой же причине вокруг точки А индикатрисы наблюдается преобладание интенсивности ИК-излучения в сравнении УФ энергетическим потоком. Указанная зона индикатрисы характеризуется таким положением импульсной лампы, когда в направлении визирования фотоприемника попадает полный радиационный поток от одной части плазменного канала и ИК-излучение от нагретой стенки другой части.

2. Индикатрисы на рисунках 4.9,б и 4.9,в схожи между собой. Отличие состоит в интенсивности излучения, достигающего приемного окна фотоприемников. В случае положения импульсной лампы, показанного на рисунке 4.1,г, интенсивности излучения в обоих исследуемых спектральных диапазонах превышают примерно в полтора раза данные, полученные при измерениях по схеме рисунка 4.1,в. Учитывая тот факт, что измерения проводились на расстоянии более 2,5 м, то по правилам фотометрии, исследуемую лампу можно рассматривать как точечный источник. Поэтому полученный результат объясняется суперпозицией энергетических потоков от двух частей плазменного канала, достигающих входного окна приемника излучения. Наблюдаемые провалы в ходе кривых индикатрис (рисунок 4.9,б и 4.9, в) в диапазоне  $60^\circ - 150^\circ$  обусловлены малой протяженностью излучающей поверхности третьей части плазменного канала, соединяющей два параллельных отрезка разряда [3, 4]. Неравномерность излучения в указанных направлениях связана с технологическими сложностями при изготовлении третьей зоны, и как следствие, усилением эффектов преломления и френелевского отражения кварцевой оболочкой потока излучения.

В заключение необходимо отметить, что для установок обеззараживания полученные данные позволяют определить эффективное время воздействия УФ-излучения на поверхность, по энергетической экспозиции площадки, расположенной в направлении минимального значения на индикатрисе излучения импульсной лампы U-образной конфигурации.

#### 4.3. Особенности работы разработанной лампы с внешней колбой

Данный раздел посвящен изучению влияния применяемой в ламповом узле внешней кварцевой колбы на электрические параметры, пространственное распределение излучения и теплофизическое состояние размещенной в ней импульсной лампы. В начале раздела рассмотрим необходимость в применении внешней колбы из кварцевого стекла.

Хорошо известно [148], что побочным явлением от воздействия УФ-излучения на кислород в воздухе, является образование в окружающем импульсную лампу пространстве озона, который оказывает раздражающее действие на дыхательные пути человека (кашель, отечность и першение в горле, чувство сдавливания в груди, заложенность), вызывает воспаление и повреждение клеток эпителия трахеи, бронхов, способствует повышенной восприимчивости дыхательной системы к инфекции, обострению астмы и т.д. Причиной появления озона в установках обеззараживания служит фотолиз воздуха под воздействием УФ-излучения, механизм которого подробно изучен в работах [149, 150].

Таким образом, чтобы добиться возможности применения УФ установок в медицинских учреждениях, необходимо разработать техническое решение, позволяющее устранить образования озона в обрабатываемом помещении выше норм ПДК. Предложенное в работе [15] конструктивное исполнение лампового узла (рисунок 4.10), представляющего собой комбинацию импульсной ксеноновой лампы с U-образным плазменным каналом и имеющую специальные отверстия внешнюю кварцевую колбу, полностью обеспечивает бактерицидную эффективность обеззараживания воздуха, равной 99,9 % (т.е. из каждых 1000 уничтожается 999 микроорганизмов) по санитарно-показательному микроорганизму *St.Aureus* при работе установки в течение 36 секунд [15]. При этом средняя по объему концентрация озона в воздухе, которая в указанных условиях составила  $49 \text{ мкг/м}^3$ , не превышает предельно допустимую концентрацию озона для воздуха рабочей зоны равную  $100 \text{ мкг/м}^3$  (см. ГН 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»).

Рассмотрим принцип работы предложенного в [15] технического решения лампового узла. Импульсная газоразрядная лампа 7 выполнена в виде кварцевой трубки U-образной (рисунок 4.10) формы, полость которой заполнена инертным газом ксеноном при давлении 300 – 400 мм рт. ст., а на торцах герметично установлены электроды 8 из торированного вольфрама. Данная конструкция размещена в кожухе 9 из прозрачного для бактерицидного излучения материала (например, из плавленого кварца, спектральный диапазон прозрачности которого обычно составляет 185 – 2700 нм, или из сапфира), в котором выполнены отверстия 10 нижнего уровня и отверстия 11 верхнего уровня, расстояние между которыми составляет  $h$ . Кожух 9 и импульсная газоразрядная лампа 7 установлены на корпусе 1, предпочтительно, вертикально с помощью диэлектрического фланца 12.

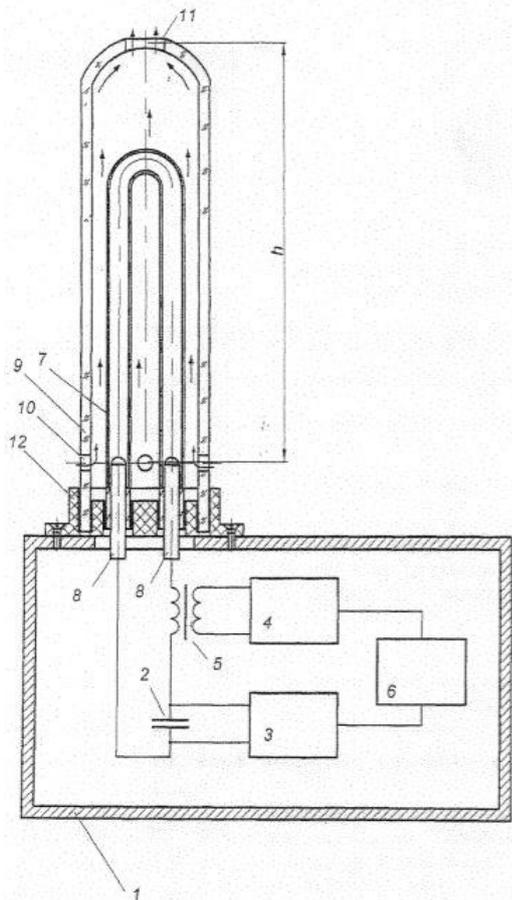


Рисунок 4.10. Блок-схема установки для обеззараживания воздуха [15].

1 – корпус установки, 2 – накопительный конденсатор, 3 – высоковольтный источник постоянного тока, 4 – генератор импульсов поджига, 5 – импульсный трансформатор, 6 – , 7 – импульсная лампа, 8 – электродные узлы, 9 – внешняя кварцевая оболочка, 10, 11 – отверстия верхнего и нижнего уровня, 12 – диэлектрический фланец.

Установка для обеззараживания воздуха характеризуется экспериментально полученным соотношением (4.1), связывающим конструктивные геометриче-

ские параметры кожуха 9 и энергетические (режимные) параметры работы импульсной газоразрядной лампы 7 установки:

$$h \cdot \frac{S_в^2 \cdot S_н^2}{S_в^2 + S_н^2} = \frac{1}{A} \cdot C^2 U_c^2 f^2 \quad (1)$$

где  $h$  – расстояние между отверстиями верхнего и отверстиями нижнего уровня (м);  $S_в$  – суммарная площадь отверстий верхнего уровня ( $\text{м}^2$ );  $S_н$  – суммарная площадь отверстий нижнего уровня ( $\text{м}^2$ );  $A = (2-30) \cdot 10^{13}$  ( $\text{Дж}^2/\text{м}^5\text{с}^2$ ) – энергетический коэффициент согласования;  $U_0$  – напряжение заряда накопительного конденсатора (В);  $f$  – частота повторения импульсов генератора импульсов поджига (Гц).

Заявленный диапазон  $A=(2-30) \cdot 10^{13}$   $\text{Дж}^2/\text{м}^5\text{с}^2$  обеспечивает оптимальность и эффективность одновременно протекающих процессов свободной конвекции внутри кожуха 9 с одновременным охлаждением импульсной газоразрядной лампы 7, реакции образования озона из кислорода воздуха при воздействии коротковолнового участка ультрафиолетового излучения и механизма термического разрушения озона за счет тепла, выделяющегося при импульсном разряде в газоразрядной лампе 7. В итоге перечисленные процессы обуславливают надежную работу импульсной газоразрядной лампы 7 и высокую степень обеззараживания воздуха при низком уровне образования озона в обрабатываемом помещении.

Применение в газоразрядных лампах второй внешней оболочки хорошо известно и широко распространено [20, 151, 152]. Функциональное назначение наружных колб зависит от эксплуатационных характеристик, предъявляемых к изделию:

- Обеспечение теплового режима разрядной трубки. Особенно данное требование актуально для ламп с разрядом в парах ртути и ее смесей с щелочными металлами [20, 151].

- Изоляция от воздействия внешней среды нагретых элементов газоразрядной лампы с целью исключения окисления конструктивных материалов [20, 152].
- Выполнение функции отражающей системы, для чего внешней колбе придают определенную форму и покрывают внутреннюю поверхность отражающим слоем [20].
- Снятие тепловых нагрузок с разрядной трубки посредством теплопроводности газонаполненного инертным газом объема внешней оболочки, охлаждаемой принудительным потоком воды или воздуха [8].

Предложенное в работе [15] техническое решение придает новую функцию внешней колбе, т.е. термическое разрушение озона. Несмотря на наличие специальных отверстий 10, 11 на рисунке 4.10 в наружной оболочке 9 вертикальные конвективные потоки не могут в полной мере обеспечить охлаждение разрядной трубки разработанной лампы, что может привести к снижению ее надежности.

На первом этапе нами были проведены измерения тепловых полей внешней колбы и разрядной трубки, по методике подробно рассмотренной в разделе 2.2.3. Температурный профиль импульсной лампы изучался после выхода в номинальный режим работы изучался после выхода в номинальный режим в момент снятия внешней колбы, Учитывая, что временной интервал между регистрацией температуры разрядной трубки и момента удаления наружной колбы составлял не более 10 сек., то измеренную температуру можно с высокой точностью считать равной при работе в условиях замкнутого объема, обеспечиваемого наружной оболочкой. На втором этапе измерение температуры импульсной лампы производилось при выходе в номинальный в отсутствие внешней колбы.

Таким образом, полученные результаты (рисунок 4.11) позволяют оценить предложенное авторами работы [15] техническое решение в части влияния на температурный профиль импульсной лампы при наличии или отсутствии внешней колбы.

Из приведенных на рисунке данных следует:

- На протяжении всего разрядного канала температура поверхности разрядной трубки равномерна, что связано с потерями энергии излучением и теплопроводностью ксеноновой плазмы, а конвекционные потоки воздуха внутри внешней колбы не оказывают существенного влияния на тепловой баланс нагретой оболочки лампы.

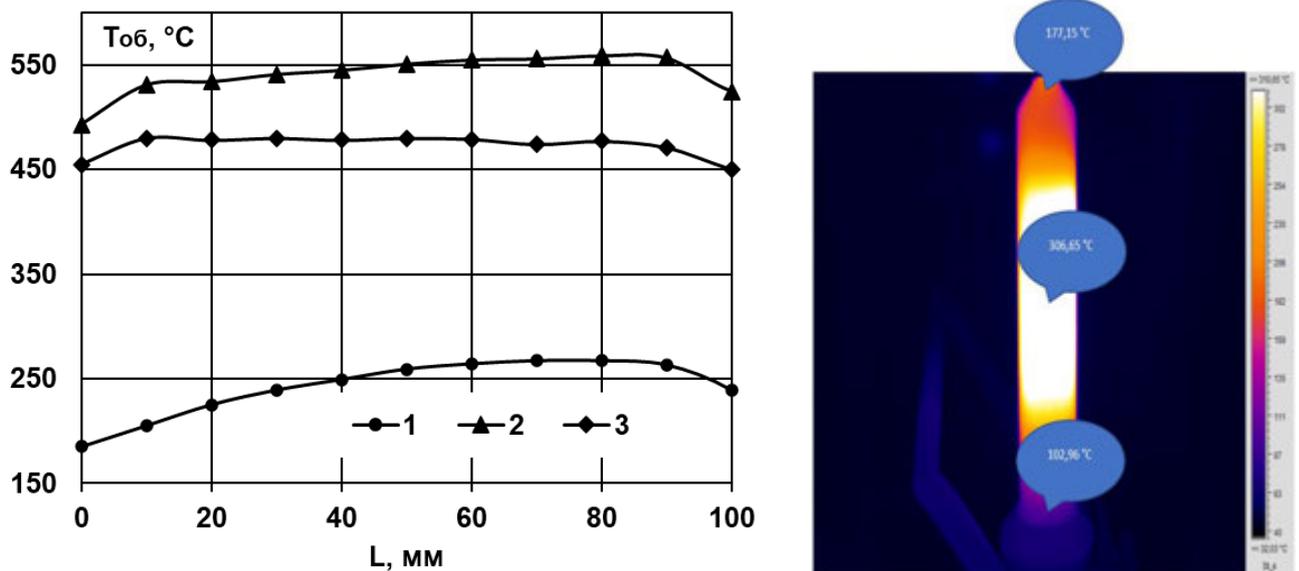


Рисунок 4.11 Температурный профиль и фото внешней колбы разогретого лампового узла с разрабатываемой импульсной ксеноновой лампой.

- Наличие внешней колбы способствует повышению температуры разрядной колбы примерно на 100 °C, что не может существенно сказаться на термодинамическом состоянии плазмообразующей среды.

- В зоне рабочей поверхности электрода ( $L=0$ ) температура оболочки в присутствии внешней колбы больше на 30 °C, чем без нее, что не сможет каким – либо образом отразиться на надежности спая колпачкового токоввода с кварцевым стеклом, который находится на удалении от торца электрода более 75 мм.

В продолжение начатых в разделе 4.2.3 исследований пространственного распределения излучения разработанной лампы возник вопрос о возможных

искажениях полученных на рисунке 4.2 данных в случае размещения ее во внешнюю нагретую оболочку. По методикам исследования, описанным в разделе 4.2.2 проведен сравнительный анализ пространственного распределения излучения при наличии внешней колбы и без нее (рисунок 4.12)

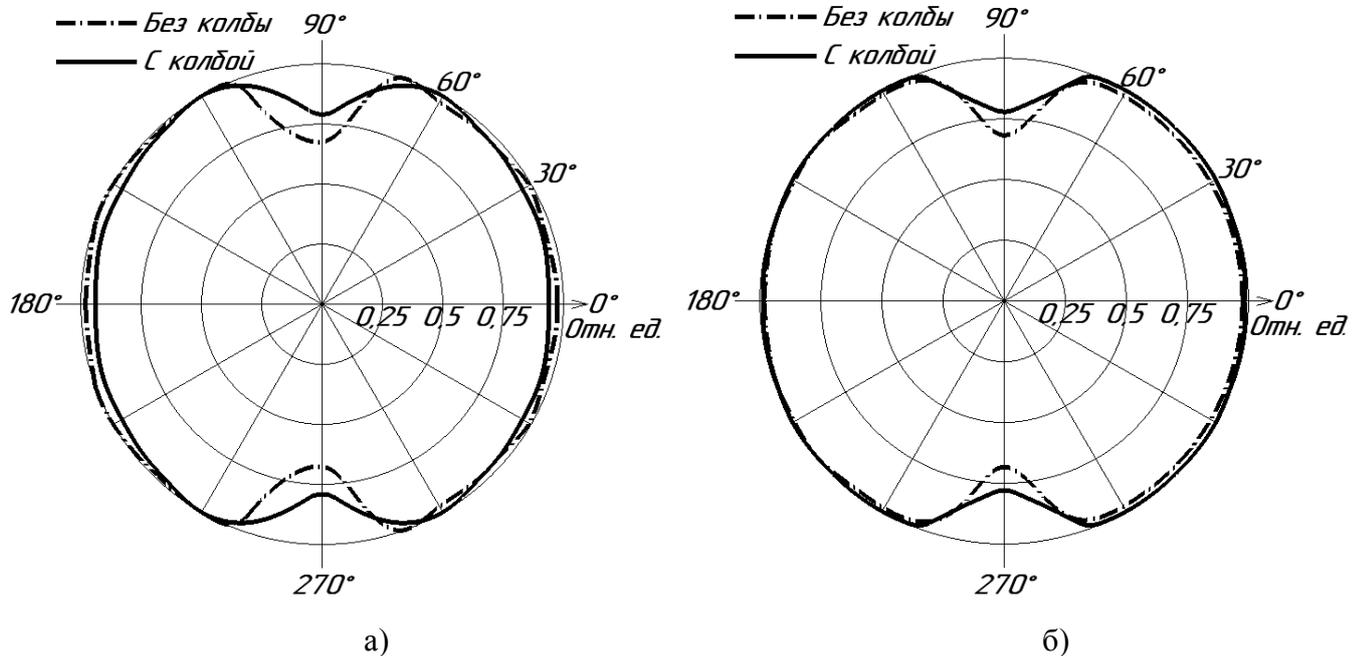


Рисунок 4.12. Пространственное распределение излучения лампового узла с разработанной лампой в УФ (а) и средней ИК (2) областях.

Анализ представленных данных позволил сделать вывод, что внешняя колба практически не искажает ранее полученных индикатрис (рисунок 4.2). Единственное отличие состоит в том, что за счет нагрева наружной оболочки уширяется ИК индикатриса в области от  $60^\circ$  до  $240^\circ$ . Таким образом, предложенное авторами техническое решение не снижает эффективности разработанной лампы, но вносит дополнительный эффект, а именно, исключает возможность распространения озона в обрабатываемом помещении.

#### 4.4. Сопоставление характеристик разработанной газоразрядной лампы с серийным образцом

Цель диссертационной работы состояла в разработке импульсного ксенонового газоразрядного источника УФ-излучения с U-образным плазменным кана-

лом, обеспечивающего максимальную энергетическую экспозицию в спектральном диапазоне 200 – 300 нм при сроке службы выше  $2,5 \cdot 10^6$  импульсов. Поэтому в данном разделе рассматривается посредством сравнения электрических характеристик возможность использования источника питания, входящего в состав установки УФ обеззараживания «Альфа-1», и изучение срока службы разработанного источника УФ-излучения в составе лампового узла ФК-22/150.

#### 4.4.1 Сравнение электрических характеристик разработанного источника УФ-излучения с серийным образцом импульсной лампы

В данном разделе выполняется сопоставление электрических характеристик серийно выпускаемых импульсных ксеноновых ламп типа ФК-22/150 и разработанного источника УФ-излучения на основе колпачкового токоввода. Одновременно производится проверка правомочности использования для разряда U-образной конфигурации, имеющего заэлектродные балластные объемы, представленных в разделе 1.2.2 формул для расчета параметров плазмы импульсных ламп накачки лазеров [41 – 44]. Для сравнительного анализа параметров указанных импульсных ламп была использована экспериментальная установка, подробно описанная в разделе 2.2.1 и представленная на рисунке 2.7, при этом исследуемые лампы работали в штатных режимах установки «Альфа-1» (см. раздел 2.2.1). Полученные результаты сведены в таблицу 4.1. Из анализа представленных данных следует:

- Сопротивление плазменного канала в квазистационарном состоянии разряда для лампы с колпачковым токовводом меньше на 18 %, чем это наблюдается в случае серийной лампы. Это связано с более высокой плотностью тока, обусловленной уходом рабочего газа в заэлектродный объем. Расчет сопротивления плазменного канала по уравнениям 1.4 и 1.5 показал значения  $R_l = 0,5$  Ом, что в два раза ниже данных, приведенных в таблице 4.1. Возможно, данное явление связано с пониженным значением коэффициента  $k$ , который учитывает давление плазмообразующей среды в холодном состоянии и не связан со средней температурой

разряда (радиальным температурным профилем) и температурой в заэлектродном объеме.

Таблица 4.1

Электрические характеристики разработанного источника УФ-излучения с используемой в составе установки «Альфа-1» серийной импульсной лампы

№ п/п	Параметр	Тип лампы	
		Лампа с фольговым вводом	Лампа с колпачковым вводом
1	Сопротивление лампы, $R_l$ , Ом	1,14	0,94
2	Потребляемая мощность, $P_{номр}$ , Вт	974,17	988,03
3	Запасаемая энергия $E_c$ , Дж	392,08	395,21
4	Максимальный ток $I_{max}$ , А	1907	2179
5	Плотность тока в лампе, $j_{max}$ , кА/см <sup>2</sup>	4,96	5,66
6	Время достижения максимума, $t_{max}$ , мкс	47,6	49,6
7	Длительность на полувысоте, $t_{0,5}$ , мкс	99,8	91
8	Максимальная мощность в лампе, $P_{max}$ , кВт	4027	4373
9	Плотность мощности в максимуме, $P_s$ , кВт/см <sup>2</sup>	65	71
10	Объемная плотность мощности, $P_v$ , кВт/см <sup>3</sup>	374	406
11	Энергия в плазме, $E_l$ , Дж	351,8	351,72
12	Объемная плотность энергии, $E_v$ , Дж/см <sup>3</sup>	33	33
13	КПД энерговклада, %	90,28	89

В работе [43] Басовым Ю.Г. приводится следующее уравнение для расчета сопротивления плазменного столба:

$$R = 2,08l(S_0i)^{-0.5}$$

где  $l$  и  $S_0$  - соответственно длина плазменного канала и площадь сечения разряда.

Подставляя значения тока в максимуме импульса, получаем для серийной лампы  $R_{лс} = 2,01$  Ом, а для разрабатываемого импульсного источника УФ-излучения  $R_{лк} = 2,0$  Ом. В данном случае представленное автором работы [43] уравнение для  $R_l$  сформулирована в предположении постоянства электропроводности ксеноновой

плазмы на протяжении всего импульса тока, что представляется не совсем правомочным утверждением, так как электропроводность разряда напрямую связана с температурой.

В тоже время, в полученный интервал расчетных величин сопротивления плазмы  $0,5 \leq R_{л} \leq 2,1$  Ом входят полученные нами экспериментально значения  $R_{л}$ , что позволяет производить оценки параметров разрядного контура, используя приведенные в разделе 1.2.2 уравнения.

- Заниженная длительность по уровню 0,5 токового импульса у разработанной лампы связана с возросшей плотностью разрядного тока. Остальные параметры, определяющие электрические характеристики плазмообразующей среды близки по величине друг к другу.
- Наблюдаемое снижение КПД энергозаклада в ксеноновую плазму потребует дополнительных совместных работ по оптимизации параметров разрядного контура и созданию новых конструктивных решений (увеличения давления ксенона, снижения балластных объемов и т.д.).

#### 4.4.2. Исследование срока службы разработанной лампы.

Данный раздел посвящен рассмотрению результатов исследования срока службы разработанного источника УФ-излучения в составе лампового узла ФК-22/150 (МЮРА.433224ТУ в номинальных режимах эксплуатации установки обеззараживания «Альфа-1»). Критерием срока службы являлось снижение средней плотности энергетической экспозиции в спектральном диапазоне от  $(237 \pm 5)$  до  $(269 \pm 5)$  нм до 30% от начального значения, величина которого составляет  $1,48 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>·нм. Для проведения ускоренных испытаний нами была использована методика, заключающаяся в сравнительных испытаниях импульсного источника УФ-излучения в разрядном контуре без дежурной дуги с аппроксимацией результатов испытаний на данные, полученные с использованием вспомогательного разряда. На рисунке 4.13 представлены результаты снижения интенсивности

УФ-излучения в энергетических и относительных единицах в течение наработки разработанной импульсной ксеноновой лампы.

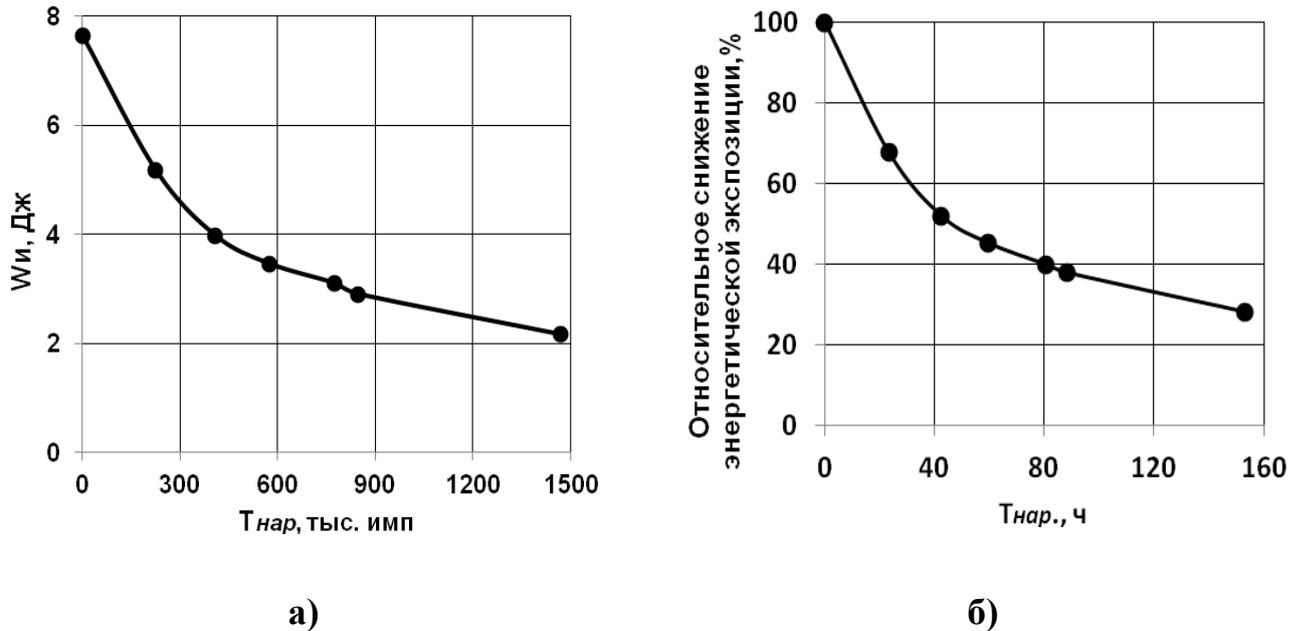


Рисунок 4.13. Снижение интенсивности УФ-излучения в энергетических (а) и относительных (б) единицах в течение срока службы.

Ранее при разработке серийного лампового узла ФК-22/150 установлено, что снижение средней плотности энергетической экспозиции в спектральном диапазоне от  $(237 \pm 5)$  до  $(269 \pm 5)$  нм до 30% от начального значения импульсной лампы в режиме с дежурной дугой  $2,5 \cdot 10^6$  имп. равноценно падению УФ-излучения после наработки 375 тыс. импульсов при работе в условиях полного разряда рабочей емкости. Из рисунка 1.3 следует, что у разработанной импульсной лампы снижение интенсивности УФ-излучения до 30 % наблюдается при достижении 1,5 млн. импульсов. При этом наиболее сильная деградация параметров УФ-излучения у обеих импульсных ламп наблюдается в течение первых 100 тыс. импульсов. Простой пересчет наработки лампы из приведенных на рисунке 1.3 данных позволяет сделать заключение, что в результате проведенных расчетных, экспериментальных, конструкторских и технологических исследований нами достигнут ресурс импульсного ксенонового газоразрядного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом в количестве  $10^7$  импульсов, т.е. поставленная цель диссертационного исследования достигнута.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. В результате анализа научно-технической литературы установлено, что основным способом повышения интенсивности импульсного ксенонового источника УФ-излучения является наращивание электрической энергии разряда, что влечет за собой необходимость повышения токовой нагрузки на электрические вводы и увеличения длины разрядного промежутка. Доказано, что удовлетворяет перечисленным требованиям импульсная ксеноновая лампа с U-образным плазменным каналом и колпачково-стержневым токовводом.

2. Математическая модель импульсного ксенонового разряда дополнена системой уравнений, включающей уравнения сохранения энергии, неразрывности плазмы и переноса излучения в балластных объемах импульсной лампы при их заполнении плазмообразующей средой в течение прохождения импульса тока, что позволило увеличить точность расчетов параметров плазмы за счет учета вытеснения рабочего газа в заэлектродные объемы. Реализация доработанной расчетной модели позволила:

- определить, что в балластные объемы уходит 40 – 50% наполняющего газа, который вытесняется практически за время достижения током максимума  $t_m$ .

- установить, что на протяжении периода спада тока эффективное давление разряда  $p_{0эф}$  не изменяется, т.е. квазистационарное состояние в разряде реализуется при  $p_{0эф} = \text{const}$ .

- сформировать аппроксимационные зависимости электрофизических характеристик импульсной ксеноновой лампы от начального давления, плотности тока и радиуса разрядной трубки, что послужило основой при создании конструкции разрабатываемой лампы.

3. Выполненные экспериментальные исследования позволили определить:

- Влияние заэлектродного объема  $V_z$  на электрические параметры и характеристики УФ-излучения. Показано, что при фиксированной величине разрядного объема  $V_p$  уменьшение отношения  $V_z/V_p$  приводит к корреляционному повышению плотности тока и энергетической экспозиции в спектральном диапазоне 200 – 300 нм на 7 %.

- Зависимость характеристик ксеноновой лампы от воздействия собственного излучения двух параллельных частей U-образного плазменного канала. Установлено, что в результате взаимного облучения обращенных друг к другу поверхностей кварцевой разрядной оболочки происходит повышение плотности тока на  $420 \text{ А/см}^2$  в квазистационарной стадии разряда и, как следствие, рост энергетической экспозиции в спектральном диапазоне  $200 - 300 \text{ нм}$  на  $12 \%$ . Доказано, что основной вклад в рост температуры плазмы оказывает собственное излучение импульсной лампы с длинами волн более  $0,8 \text{ мкм}$ .

4. Для создания базовой конструкции и технологии создаваемого импульсного источника УФ-излучения:

- Разработана конструкция электродов, обеспечивающая длительную и устойчивую работу в режиме разовых вспышек. Путем решения уравнения теплопроводности с учетом охлаждения с боковых поверхностей излучением по закону Стефана – Больцмана, а также экспериментальными исследованиями по разработанным оригинальным методикам, определены оптимальные температурные режимы работы и предложена конструкция составного катода, основанная на пайке его составных элементов с учетом особенностей воздействия плазмы на рабочую поверхность и физико-химических процессов, происходящих при формировании спая. Выполненные конструкторские исследования позволили обеспечить срок службы не менее  $10^7$  импульсов.

- Разработан способ соединения кварцевой разрядной трубки с электродным узлом посредством высокочастотной пайки легкоплавким припоем на основе олова по предварительно нанесенному магнетронным способом титановому покрытию. Выполнен термодинамический анализ протекающих реакций и экспериментально изучены процессы формирования спая кварц – ковар. Предложенная технология изготовления импульсной ксеноновой лампы с колпачково-стержневым токовводом и U-образным плазменным каналом позволила увеличить выход годных изделий до  $80 - 90\%$  в сравнении с  $50 - 60\%$  в случае серийных источников УФ-излучения.

5. Изучены эксплуатационные характеристики разработанной лампы. Впервые исследованы процессы, происходящие в разряде и ограничивающей его кварцевой оболочке при выходе в номинальный режим работы, представлены результаты исследований пространственного распределения излучения U-образного плазменного канала в УФ- и ИК- спектральных диапазонах. Изучено влияние внешней кварцевой колбы на параметры разработанной лампы и даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию предложенной конструкции импульсного источника УФ-излучения.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Вирулицидная активность импульсного ультрафиолетового излучения сплошного спектра в отношении коронавируса SARS-CoV-2 / А.Ю. Зверев, С.В. Борисевич, Д.Н. Масыкин и др. // Медицинский алфавит. -2020.- №18. – С. 55-58.
2. Исследование бактерицидной эффективности обеззараживания воздуха и открытых поверхностей импульсным ультрафиолетовым излучением сплошного спектра / Н.В. Шестопалов, В.Г. Акимкин, Я.А. Гольдштейн и др. // Медицинский алфавит. - 2017 .- Т.2, №18 - С. 5-8.
3. Patent 6264802 (USA), Int. C07C 1/00. Method and device for UV treatment of liquids, air and surfaces/ Kamrukov A.S., Shashkovskiy S.G. Ylovik M.S. // Date of patent 24.07.2001.
4. Патент РФ № 2475271. Система для обеззараживания воздуха в зданиях /МПК А61L 9/16 / Я.А. Гольдштейн, С.Г. Шашковский, С.В. Бирюков // 02.06.2006.- Бюл. №5.
5. J.P. Haas, J. Menz, St. Dusza, M.A. Montecalvo. Implementation and impact of ultraviolet environmental disinfection in an acute care setting // Am. J. Infect. Control. — 2014. — v. 42 — P. 586–590.
6. Comparative disinfection efficiency of pulsed and continuous-wave UV irradiation technologies / Z. Bohrerova, H. Shemer, R. Lantis, Ch.A. Impellitteri // Water Research. — 2008. — v.42. — P. 2975–2982.
7. С. Г. Киреев, А. И. Кулебякина, С. Г. Шашковский, К.А. Тумашевич Алгоритм расчета характеристик импульсного газоразрядного источника УФ-излучения для проточных систем биоочистки // Прикладная физика. – 2019. - № 5. – С. 71-77.
8. Импульсные источники света / И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.– 472 с.
9. Гавриш С.В., Логинов В.В. Материалы оболочек разрядных ламп высокого давления. Кварцевое стекло // Технология машиностроения. - 2009. -№ 8.– С. 5-10.

10. Кирсанов В.П., Маркелова С.И., Трошкин С.В. Пределы нагрузок импульсных ламп // Квантовая электроника - 1973. – №6(18) – С. 43-47.
11. Бордачев Е.Г., Вицинский С.А., Кулаков В.И., Петров А.В. Экспериментальное сравнение пределов нагрузки ксеноновых импульсных ламп, работающих в режимах двойного и одиночного разрядов // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1982. - №3 - С. 37-40.
12. Кобзарь А.И. Исследование информативных параметров износа импульсных источников оптического излучения. // Электронные информативные системы. -2017. - №2 (13). - С.65 -79.
13. Гавриш С.В. Исследование временной зависимости радиационных процессов в импульсных разрядах высокого давления. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика Радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2011. – вып. 3. - С 101-105.
14. Басов Ю.Г. Светосигнальные устройства. – М.: Транспорт, 1993. – 309с.
15. Патент РФ № 2396092. Установка для обеззараживания воздуха /МПК А61L 9/16 / Я.А. Гольдштейн, С.Г. Шашковский // 10.08.2010.- Бюл. №22.
16. А.с. 993364 (СССР), Н 01 J 61/36. Герметичный токоввод в кварцевую колбу газоразрядной лампы / А.А. Вартанян, И.А. Сахарова // Б.И.–1983. – Бюл. № 4.
17. Басов Ю.Г., Ролдугин В.И., Сысун В.В. Токовводы в кварцевые газоразрядные лампы // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1988. - №4 - С. 43-52.
18. Леонов Г.С. Лампы накачки лазеров // Светотехника. – 1997. - №6.- С. 13 - 15.
19. Камруков А.С. , Кулебякина А.И. Импульсные ксеноновые лампы. Техника, эксперимент, расчет: Учебное пособие. -М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 – 88с.
20. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720с.
21. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. – М.: Атомиздат, 1980. – 182 с.
22. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Изд-во Иностранной лит-ры, 1961. – 370 с.

23. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. - М.: Гос. Изд- во Техничко – теоретической лит-ры, 1950. – 672с.
24. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. - М.: Физматлит, 2008 г. - 656 с.
25. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. - М.: ИД Интеллект, 2009. - 736с.
26. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004. – 704 с.
27. Градов В.М. Разработка методов расчета и исследование радиационных процессов в системах с разрядными источниками селективного излучения: Дис. докт. тех. наук. – М., 2002. - 326 с.
28. Градов В.М. Моделирование теплового воздействия нестационарной сильно излучающей плазмы на стабилизирующую разряд оболочку в режиме периодического следования импульсов // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ2020). Москва, 2020. - С. 216-218.
29. Гавриш С.В., Градов В.М., Желаев И.А. Сильноизлучающие импульсные разряды в инертных газах, стабилизированные оболочкой. // Тезисы докладов XXXVIII Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. - 2009. - М.: НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН"- С. 219.
30. Импульсно - периодические разрядные источники излучения УФ и ИК спектральных диапазонов/ С.В. Гавриш, В.М. Градов, И.А. Желаев и др. // IX Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов.- М.: НИЦ «Инженер», 2012.-С. 126 – 129.
31. Градов В.М., Гавриш С.В., Коробков С.С., Пугачев Д.Ю. Ультрафиолетовое излучение импульсно – периодических разрядов в инертных газах // Прикладная физика. – 2019. - №6. – С. 18 -23.
32. Маршак И.С. Коэффициент полезного действия трубчатых импульсных ламп // Светотехника. – 1957. - №1.- С. 17-20.
33. Гаврилова Л.И., Дойников А.С., Жигач С.Г., Молчанова М.К. Спектральные характеристики ксеноновых ламп в жестких режимах в интервале 180-1100 нм // Светотехника. – 1971. - №5.- С. 14-15.

34. Дойников А.С. Спектральные характеристики излучения трубчатых ксеноновых импульсных и дуговых ламп // *Обзоры по электронной технике.* – 1976. – вып. 11 (154) - 29 С.
35. Басов Ю.Г., Болдырев С.А., Токарева А.Н. Излучение импульсного разряда короткой длительности в смесях паров кремния и инертных газов // *ЖПС.* - 1976. – Т. XXIV, вып.3.- С. 419 – 422.
36. Басов Ю.Г. Коррекция спектрального состава излучения импульсных ламп с разрядом короткой длительности // *ЖПС* -1982. – Т. XXXVI, вып.6.- С. 1022 – 1026.
37. Маршак И.С. О внутреннем поглощении излучения в импульсных трубчатых лампах // *Светотехника.* – 1959.- №5. – С. 17-19.
38. Дойников А.С., Еремин Е.А., Ю.А. Калинин, Пахомов В.К. Пространственное распределение энергии излучения и КПД трубчатых импульсных ламп // *Импульсная фотометрия.* - Л.: Машиностроение, 1972. – вып.2. - С.126-130.
39. Басов Ю.Г., Гаврилова Л.И., Луцет Б.Я. Индикатрисы и спектры светосигнальных разрядных ламп // *Светотехника.* – 1990. - №5.- С. 16-17.
40. Гаврилова Л.И., Дойников А.С., Пахомов В.К. Обобщение характеристик излучения импульсных ксеноновых ламп. // *Импульсная фотометрия.* - Л.: Машиностроение, 1973. – вып.3. - С.105 -113.
41. Белоусов Н.Н., Ермаков Н.И. Влияние начального давления на некоторые параметры электрического разряда в импульсных ксеноновых лампах накачки // *Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника.* – 1979. - №1 - С. 100 - 101.
42. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. — М.: Сов. радио, 1980.—104 с.
43. Басов Ю.Г., Болдырев С.А., Литвинов В.С. Расчет параметров разрядного контура и ламп накачки лазеров на красителях // *Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы.* – 1983. - №4 - С. 33 - 36.

44. Пелипенко В.П., Дзюбенко М.И., Шевченко В.В. Мощные разряды короткой длительности в импульсных лампах // ЖПС -1985. – Т. XXXXIII, вып.6. - С. 901 – 910.
45. Басов Ю.Г., Болдырев С.А., Цибизов В.Д. Электропроводность ограниченного кварцевыми стенками мощного импульсного разряда в ксеноне. – ЖТФ, 1978. - Т.48, №8. - С. 1654-1656.
46. Басов Ю.Г., Литвинов И.И., Токарева А.Н., Усова В.М. Влияние удельной мощности и конструктивных параметров импульсных ламп на оптические характеристики разряда короткой длительности // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1978. - №2 - С. 131 - 133.
47. Будник В.Н., Козлов Н.А., Малашенков В.А. Влияние конструктивных параметров трубчатых ксеноновых ламп при длительности разряда 15-25 мксек. // Светотехника. – 1972. - №4.- С. 21 - 22.
48. Луцет Б.Я., Самодергин В.А., Щукин Л.И. Характеристики импульсных источников света, работающих в частотных режимах// Обзоры по электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1975 – вып. 4 (287) - 56с.
49. Иванов В.В., Кобзарь А.И., Никифоров В.Г. Связь параметров износа и излучательных характеристик импульсных трубчатых ламп. // Электронная техника. Сер. Управление качеством и стандартизация. – 1972. - №9.- С. 86 – 91.
50. Козлов Н.А., Мурашов В.Г., Стариков В.Н., Фомин В.В. О механизме колебаний границы газоразрядного канала в импульсных лампах накачки // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1978. - №4. - С. 92 - 96.
51. Басов Ю.Г., Болдырев С.А., Дзюбанов С.Ф., Фомин В.В. Особенности развития ограниченного стенками мощного импульсного разряда в ксеноне // ТВТ. -1978. - Т.16, №5. - С. 1095 – 1097.
52. Белоусова Л.Е., Леонов Г.С. О связи долговечности водоохлаждаемых ламп непрерывного горения со статической усталостью кварцевого стекла. // Светотехника. -1979. - №12. - С. 8.

53. Бялко Н.Г., Кошелев А.А., Подгаевский В.М. К возможности повышения предельных нагрузок импульсных ламп // Светотехника. – 1983 - №7. – С. 12-13.
54. Герасимова Л.Г., Киселев В.Г., Овчаров А.Т. Модель старения оболочек газоразрядных импульсных ламп // Светотехника -1990. - №5. - С. 11 – 13.
55. Басов Ю.Г., Болдырев С.А. Тепловые потери в ксеноновых импульсных разрядах с разрядом короткой длительности. // ЖПС. -1979. – Т. XXXI, вып.4.- С. 645 – 650.
56. Белоусова Л.Е. О разрушении импульсной лампы при испарении стенок в режиме короткой вспышки // Светотехника. – 1973 - №2. – С. 12-13.
57. Градов В.М., Иванов В.В., Терентьев Ю.И., Щербаков А.А. К теории мощного нестационарного ксенонового разряда с учетом испарения стабилизирующих его стенок // ТВТ. -1981. - Т.19, №1.- С.28 –35.
58. Иванов В.В., Никифоров В.Г., Розанов А.Г. О физическом механизме разрушения импульсных ламп // ТВТ. -1981. - Т.18, №6. - С.1288 – 1291.
59. Долговечность ламп накачки, работающих в режиме повторяющихся импульсов. // Р.В. Браиловская, С.С. Енгоян, А.И. Кобзарь и др. / Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1980. - №3 - С. 95 - 98.
60. Подгаецкий В.М., Скворцов Б.В. Предельные нагрузки импульсных источников излучения с малой длительностью вспышек // Квантовая электроника. – 1972. - №4 (10). – С. 82 – 85.
61. Кобзарь А.И, Скворцов Б.В. Ускоренные испытания импульсных трубчатых ксеноновых ламп на долговечность в форсированных режимах нагружения // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1972. - №9. - С. 18 - 21.
62. Кирсанов В.П., Маркелова С.И., Трошкин С.В. Пределы нагрузок импульсных ламп// Квантовая электроника. – 1973. - №6. – С. 43 – 47.
63. Исследования изменений структуры и свойств оболочек из кварцевого стекла импульсных ксеноновых ламп. В.Г. Верева, Л.В. Нозик, В.Б. Браиловский и др. // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1973. - №8 - С. 82 - 89.

64. Никифоров В.Г. Влияние способа иницирования разряда импульсных ламп на их долговечность // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1978. - №2 - С. 128 - 130.
65. . Мандрыко Ю. А Исследование режимов функционирования газоразрядной лампы в электрической схеме с коммутирующим биполярным транзистором с изолированным затвором // Успехи прикладной физики. - 2016. –Т. 4, № 4. – С. 416 – 427.
66. Smith B. Overview Of Flashlamps And Arc Lamps / Proc. SPIE 0609, Flashlamp Pumped Laser Technology. 1986, V. – 609. - PP. 1-41, <https://doi.org/10.1117/12.966620>.
67. Любимов М.Л. Спаи металла со стеклом. - М.: Энергия, 1968. – 256 с.
68. Юрков Л. Ф., Леко В. К. Переходные стекла и спаи в электровакуумной промышленности. – М.:Энергия, 1979. - 128 с.
69. Амбарцумян А.Г. Высококремнеземистые стекла: состав, свойства, оборудование для производства. // Снабженец. – 2005. - №18 (468). – С. 139-141.
70. О прочности спая вольфрамового токоввода в кварц на переходном стекле. / В.С. Беспалов, В.А. Ивлева, В.И. Иноземцева и др. // Светотехника. – 1984. - №8.- С. 9 - 10.
71. Сасоров В.П. Герметичные вводы в кварцевые лампы // Электровакуумная техника. – 1967. - №43, С. 12 – 22.
72. Патент РФ (полезная модель) №159919. Герметичный токоввод в кварцевое стекло оболочки газоразрядной лампы. МПК H01J 61/36/ С.В. Гавриш, С.А. Гаврилов, С.В. Пучнина, А.В. Сурдо // 20.02.2016, Бюл. №5.
73. А. с. 661652 (СССР), МПК<sup>7</sup> H 01 J 61/36 Токоввод в лампу из кварцевого стекла / Б.А. Константинов, Г.С. Леонов, Л.Г. Сапрыкин и др. // Б.И. –1979. – Бюл. № 17.
74. А. с. 1012373 (СССР), МПК<sup>7</sup> H 01 J 61/36 Герметичный токоввод в кварцевую колбу газоразрядной лампы / В.Г. Филимоненко, С.С. Герасимов, Б.Х. Хузмиева и др. // Б.И. –1983. – Бюл. № 14.

75. Гоухберг Д.А. Герметичные вводы в кварцевое стекло на большие токи // Сборник по вакуумной технике. – М.: Госэнергоиздат, 1956.- Вып. 8.–С. 41 - 47.
76. Гоухберг Д.А., Ровинский Р.Е. Определение нагрузок по току для молибденовых цилиндрических вводов в кварц // Сборник по вакуумной технике. – М.: Госэнергоиздат, 1967. - Вып. 3. – С. 3-17.
77. Игнатъев В.Г., Мнускин В.Е., Скворцов Б.В. Импульсные лампы с колпачковыми вводами // Светотехника. – 1969. - №11.- С. 17-18.
78. Батыгина Э.И., Шмелев А.Е. Спаи кварцевого стекла с металлами // Обзоры по электронной технике. – 1970. – вып. 2 (155) - 28 С.
79. А. с. 378997 (СССР), МПК<sup>7</sup> Н 01 J 61/36 Колпачковый токоввод в газоразрядную лампу. / В.А. Малашенков, Л.А. Миль, В.А. Писулин // Б.И. –1973. – Бюл. № 10.
80. А.с. 695980 (СССР), МКИ<sup>3</sup> С 03 С 27/04 Способ соединения кварцевого стекла с металлом / В.Б. Браиловский, Б.А. Константинов, Н.В. Ермакова и др. // Б.И.-1979.- Бюл. № 41.
81. Басов Ю.Г. Источники накачки микросекундных лазеров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 240с.
82. Градов В.М., Коробков С.С., Терентьев Ю.И. Моделирование нестационарных процессов в импульсных трубчатых ксеноновых лампах в условиях возврата в плазму отраженного излучения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2019. - № 1. - С. 90 – 107.
83. Методы расчета систем накачки твердотельных лазеров / В.М. Градов, В.Г. Дорогов, Б.А. Константинов и др. // Обзоры по электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1978 – вып. 10 (539). - 68 с.
84. Гавриш С.В., Градов В.М. Влияние собственного отраженного излучения на спектрально - энергетические характеристики разрядов в метало - инертных плазмообразующих средах// VII Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов.- М.: НИЦ «Инженер», 2006. -С. 163-166.

85. Гавриш С.В. Воздействие внешних энергетических факторов на теплофизические и радиационные характеристики импульсного цезиевого разряда // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2011. – вып. 3. - С 89-94.
86. Градов В.М. Программно – математическое обеспечение для научных исследований систем с доминирующей ролью радиационных процессов Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. -2012. - №1.- С. 110 - 135.
87. Градов В.М., Желаев И.А., Ломовской И.В. Вычислительный эксперимент в задачах излучающего газа. Метод, алгоритм, программное обеспечение для исследования импульсно – периодических газоразрядных ламп // Наука и образование: Электронное научно – техническое издание. – 2012 - №4. – С.1-17.
88. Градов В.М. Математическое моделирование селективно излучающих разрядов с сильной неравновесностью // Наука и образование: Электронное научно – техническое издание. – 2012. - №5. – С.411-419.
89. Розанов А.Г. Предельные характеристики импульсных газоразрядных источников оптического излучения для накачки лазеров // Обзоры по электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1979. – вып. 3 (636). - 46 с.
90. Васьковский Ю.М., Кирсанов В.П., Нарожная Т.П. Влияние балластных объемов импульсных трубчатых ламп на их параметры // Светотехника. – 1979. - №10.- С. 19-20.
91. Власов Ю.Н., Иконников В.П., Розанов А.Г., Стариков Б.В. Влияние приэлектродных балластных объемов на сопротивление импульсных ксеноновых ламп // Светотехника. – 1970. - №12.- С. 23 - 24.
92. Градов В.М., Коробков С.С. Моделирование процессов радиационной газодинамики в задачах исследования мощных разрядов высокого давления в ксене/ В сборнике: Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020). Москва, 2020. С. 218-220.

93. Gradov V.M., Gavrish S.V. Mathematical modeling of selective emitting nonequilibrium plasma in complex optical systems // *Light & Engineering*. – 1997. - Vol. 5, No. 3. - P. 16-19.
94. Градов В.М., Гавриш С.В., Корякина Е.А. Компьютерное моделирование процессов в разрядах в парах щелочных металлов, стабилизированных системой излучающих оболочек // Тез. докл. Международ. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. - М: Изд-во МАИ, 2003. -Т.1. - С. 208-209.
95. Андреев С.И., Гаврилов В.Е. Исследование процесса установления температуры и плотности плазмы по объему разрядной трубки // *ЖПС*. - 1971. – Т. XIV, вып.2.- С. 310 – 314.
96. Иванов В.В. Розанов А.Г., Семиохин И.А., Стариков Б.В. Определение плотности плазмы импульсного ксенонового разряда. // *ЖТФ*. –1973. - Т. 43, №2. - С. 445 – 447.
97. Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет электрофизических характеристик дуговых разрядов в криптоне и ксеноне // *ТВТ*. – 1979. – Т. 17, №6. – С. 1161 – 1166.
98. Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет нестационарного дугового ксенонового разряда совместно с ограничивающей его стенкой. – *ЖТФ* - 1979. - Т.49, №6. - С. 1216 – 1222.
99. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 285с.
100. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. – М.: Атомиздат, 1976. - 184с.
101. Бакеев А.А., Нарожная Т.П., Ровинский Р.Е., Чебуркин Н.В. Интерферометрические измерения параметров импульсного ксенонового разряда. // *Радиотехника и электроника*. – 1969. – Т.14, №11. – С. 1998 – 2001.
102. Быков И.В., Кирсанов В.П., Трошкин С.В. Работа импульсных ламп большого диаметра с сокращенной длительностью импульса. // *Квантовая электроника* - 1975. – Т. 2, №1 – С. 181 – 184.

103. Статические методы обработки эмпирических данных. – М.: Изд – во стандартов. – 1978. – 232с.
104. Басов Ю.Г., Макаров В.Н., Нархова Г.И. Характер влияния балластных объемов импульсных ламп на их излучение // Радиотехника и электроника. - 1975. – Т. 20, №11. – С. 2323-2327.
105. С.Г. Киреев, С.Г. Шашковский, К.А. Тумашевич, А.В. Абакумов Метод вычисления энергоэффективности газоразрядных импульсных ламп // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2020. - Т. 20, № 1. С. 45 – 51.
106. Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК источников // С.В. Гавриш., А.И. Кобзарь, В.С. Жмаев и др. // Прикладная физика. – 2009. №1. – С. 53-59.
107. Басов Ю.Г., Михалина Т.И., Никифоров В.Г., Сопин А.И. Влияние способа зажигания ламп накачки на энергетические характеристики лазера на красителях // ЖПС. 1974. - Т. XXXII, №4. - С. 602-606
108. Киреев С.Г., Архипов В.П., Шашковский С.Г., Козлов Н.П. Измерение спектрально-энергетических характеристик импульсных источников излучения сплошного спектра // Фотоника. - 2017. - Т. 6, № 8. С. 48–56.
109. Киреев С.Г., Тумашевич К.А., Шашковский С.Г., Абакумов А.В., Осин Н.А. Калибровка фотоэлектрических приемников импульсного излучения // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2019. - Т. 62, №11. - С. 79–84. doi: 10.17223/00213411/62/11/79
110. Пчелин В.М., Розовский Е.И., Рохлин Г.Н. Особенности измерения температуры колб высокоинтенсивных источников света термпарным способом. // Светотехника. – 1980. - №11. - С.11-14.
111. Рохлин Г.Н., Семенов Н.Я. Экспериментальное определение температуры горелок натриевых ламп высокого давления. //Светотехника. –1978. - №12. - С.4-7.
112. Гавриш С.В. Теплофизические процессы в сапфировых колбах разрядных ламп / Прикладная физика. – 2010. №4. - С. 45-49.

113. Лингарт Ю.К., Петров В.А. Измерение температуры поверхности некоторых полупрозрачных материалов// ТВТ. - 1980. - Т. 10, №1.- С. 174-180.
114. Исследования температурных полей в разрядных источниках ИК излучения с сапфировой оболочкой / С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // Оборонный комплекс России – научно - техническому прогрессу. – 2014. - №1.- С. 49 – 55.
115. Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения (Обзор) / С. В. Гавриш, С. Г. Киреев, В. В. Логинов и др. // Успехи прикладной физики. – 2020. - Т.8, № 4. - С. 251- 264.
116. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1977. - 341с.
117. Амосов В.М., Карелин Б.А., Кубышкин В.В. Электродные материалы на основе тугоплавких металлов. – М.: Металлургия, 1976. - 224 с.
118. Баранова В.И., Коновалов В.А., Шабуркина В.И. Металлокерамические катоды на основе вольфрама со скандатом бария для газоразрядных приборов // Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1984. – вып. 6(105). – С. 34-35.
119. Методика и некоторые результаты исследования температурного поля электродов дуговых ламп сверхвысокого давления / В.И. Баранова, С.Ф. Лебедева, Г.С. Леонов и др. // Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1984. – вып. 1(124). – С. 69 – 72.
120. Белоусова Л.Е. Расчет температуры электрода ксеноновой лампы // Светотехника. – 1983. - №6.- С. 9.
121. Характеристики излучения импульсного разряда в ксеноне / Д.В. Рыбка, Е.Х. Бакшт, М.И. Ломаев и др. // ЖТФ. -2005. – Т. 75, вып. 2.- С. 131 – 134.
122. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / М.Ф. Жуков, Н.П. Козлов, А.В. Пустогаров и др. – Новосибирск: Наука, 1982. – 158 с.
123. Исследование эрозии электродов в условиях импульсных разрядов с ограниченной миграцией канала/ А.В. Агеев, А.В. Колесник, Л.А. Стрелков и др. // ЖПС.- 1977. - Т. XXVI, вып. 2. –С. 213-218.

124. Распределение температуры по длине электрода дуговой лампы/ Л.Е. Белоусова, К.С. Бородин, Е.Н. Гайдуков и др.// ТВТ - 1979.- Т.17, № 5, -С. 1082 – 1085.
125. Эрбс Г. Исследование температурного режима протяженных электродов дуг высокого и сверхвысокого давлений / Светотехника – 1969.- №8. – С. 5-7.
126. Балагуров А.Я., Кубышкин В.В. Исследование баланса энергии в интенсивно излучающих импульсных разрядах в инертных газах / ТВТ. – 1973 – Т.11, вып.3, С. 503 – 507.
127. Энергетические потери на электродах и оболочке импульсной ксеноновой лампы накачки, работающей в режиме периодических импульсов // В.В. Иванов, В.Р. Лисицкий, В.Г. Никифоров и др. – Электронная техника, Сер. 11 – 1978. – вып. 3. – С. 118-121.
128. Исследование физико - химических процессов пайки конструктивных элементов газоразрядных ламп с сапфировой оболочкой / Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. и др. // Сварочное производство. – 2019. - №9. – С. 25 - 30.
129. Gavrish S.V., Loguinov V.V., Puchnina S.V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals// Welding International.- 2015. - Vol. 29, No. 1, P. 78–80.
130. Батыгин В.Н., Метелкин И.И., Решетников А.М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. - М.: Энергия, 1973. - 408с.
131. Гладков А.С., Подвигина О.П., Чернов О.В. Пайка деталей электровакуумных приборов. - М.: Энергия, 1967. - 288 с.
132. Физические величины: Справочник / Под ред. И.Е. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
133. Вульф Б.К., Борщевский С.М. Титан в электронной технике. М: Энергия. - 1975. - 184 с.
134. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екатова А.С. Металловедение пайки. – М.: Металлургия, 1976. - 264 с.
135. Ланин В. Высокочастотная конструкционная и монтажная пайка / Технологии в электронной промышленности. – 2009. - № 6. – С.23 – 27

136. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В. Вакуумноплотные спаи сапфира с металлами // Успехи прикладной физики. -2019.- Т. 7, №5.- С. 480 -501
137. Пайка металлокерамических узлов // В.И. Кулик, В.В. Степанов, Л.Л. Благутина и др. / Ритм машиностроения. – 2017. - №6. – С. 32-35
138. Исследование оловянно – титанового припоя марки ОТ-1,5 и паянных соединений кварцевого стекла с коваром. Часть 3. Исследование паянных соединений кварцевого стекла с коваром. // В.И. Шабуркина, Н.В. Ермакова, Т.В. Болгова и др./Электронная техника. Сер. Материалы.– 1978. - №8 - С. 101 -105.
139. Костин А.М., Лабарткава А.В., Мартыненко В.А. Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром // Металлофизика и новейшие технологии - 2014. – Т. 36, № 6. - С. 815 - 827.
140. Жмудь Е.С., Шмелев А.Е. Рентгенофазовое исследование взаимодействия Ti с SiO<sub>2</sub> // Неорганические материалы. – 1974. – Т.10, №10 - С. 1816-1820.
141. Физико-химические свойства окислов: Справочник под редакцией Г.В. Самсонова. М: Металлургия 1978. – 472 с.
142. Kang, Y.-B., Jung, I.-H., Lee, H.-G. Critical thermodynamic evaluation and optimization of the MnO–SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>–Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 2006, vol. 30, pp. 226–234.
143. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3т.: Т. 2. Под общ. редакцией Н.П. Лякишева. М: Машиностроение 1997. – 1024 с.
144. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник./ Под общ. редакцией Н.П. Лякишева. Т.3, М: Машиностроение 2000. – 448 с.
145. Браиловский В.Б., Ермакова Н.В., Шабуркина В.И., Шелупенин В.Т. Взаимодействие мягких припоев с конструкционными материалами в колпачковых источниках высокоинтенсивного света // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1976. - №3 - С. 105 -108.
146. Исследование оловянно – титанового припоя марки ОТ-1,5 и паянных соединений кварцевого стекла с коваром. Часть 2. Исследование фазового состава

- ва припомя OT – 1,5 // В.И. Шабуркина, Н.В. Ермакова, Т.В. Болгова и др. / Электронная техника. Сер. Материалы. – 1977. - №11 - С. 109 -114.
147. Розбери Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии. - М.: Энергия, 1972. – 456 с.
148. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: коллективная монография/ Ф.В. Кармазинов, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцев и др. – Долгопрудный: Интеллект, 2012. – 392 с.
149. Кинетика генерации озона во влажном воздухе УФ-излучением ртутной лампы низкого давления. / М.Г. Брюков, А.С. Дмитрук, Д.М. Василяк и др. // Прикладная физика. -2020.- №4.- С. 5 - 10
150. Фотоокисление примесей сероводорода и формальдегида во влажном воздухе ультрафиолетовым излучением / М.В. Богомолов, М.Г. Брюков, А.И.Васильев и др. //Успехи прикладной физики. -2019.- Т. 7, №2.- С. 165 -176.
151. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Импульсные газоразрядные источники ИК излучения для оптико – электронных систем //Успехи прикладной физики. -2018. - Т. 6, №4.- С. 333 – 348.
152. Весельницкий И.М., Рохлин Г.Н. Ртутные лампы высокого давления, М.: Энергия, 1971.- 280с.

**Личный вклад автора в получение научных результатов для публикаций  
по теме диссертации**

**«Разработка импульсного источника УФ-излучения  
с U-образным плазменным каналом для оптико-электронных систем  
обеззараживания воздуха и поверхностей»**

Вклад автора в публикациях по теме диссертации является определяющим и заключается в: выборе направления исследования и постановке задач, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, получении основных научных результатов, разработке основных теоретических положений, апробации результатов исследования, подготовке публикаций по выполненной работе [A1 – A8]. Все результаты и научные положения диссертации, выносимые на защиту, получены и сформулированы лично автором.

Личное участие автора в расчетно-теоретических работах, выполненных в соавторстве, заключается в непосредственном их выполнении [A10, A11] или равноправном участии в формировании содержательной модели и систем уравнений с комплексом граничных условий, проведение численных экспериментов по разработанным программам [A6], анализе адекватности моделей, корректировке расчетных схем и интерпретации полученных результатов [A6, A10, A11].

В работах, посвященных экспериментальным исследованиям, личный вклад автора заключается в непосредственном выполнении, участии в постановке задач или руководстве исследованиями [A1 – A9, A12, A13], разработке методик испытаний, технических решений и анализе результатов [A14, A15]. В итоге автор внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе.

В создании запатентованных решений вклад автора заключается:

- в разработке конструкторских решений [A16, A17, A19, A20],

- исследовании и разработке способов реализации функционирования газоразрядных источников и оптико-электронных систем на их основе [A18, A22 - A24],
- анализе физических и химических процессов в предлагаемом техническом решении в процессе технологической реализации и функционирования газоразрядной лампы [A17, A19, A20, A25, A26].

**Основные статьи** в периодических журналах перечня ВАК РФ:

- A1. Гавриш С. В., Кугушев Д. Н. Влияние на характеристики плазмы собственного отраженного излучения газоразрядной лампы // Прикладная физика, 2021. - № 1. – С. 31 – 38.
- A2. Повышение предельной величины удельной мощности импульсных ксеноновых газоразрядных ламп. / С.В. Гавриш, Д.Н.Кугушев, С.В. Пучнина и др. // Прикладная физика. – 2020. - №3. – С. 69 - 74.
- A3. Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения / С.В. Гавриш, Д.Н.Кугушев, С.В. Пучнина и др. // Успехи прикладной физики. – 2020. – Т.8, №4. – С. 261 – 264.
- A4. Пространственное распределение излучения импульсных ксеноновых газоразрядных ламп с различной конфигурацией плазменного канала. / Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., и др. // Прикладная физика. – 2021. – №2. – С. 37 - 44.
- A5. Оптические системы прожекторного типа на основе комбинации источников оптического излучения / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др. // Светотехника. – 2011. - №1.- С. 12-15.
- A6. Разработка модулируемых цезиевых источников ИК излучения повышенной мощности // С.В. Гавриш, В.М. Градов, Д.Н. Кугушев и др. // Прикладная физика. – 2010. – №2. – С. 85-90.
- A7. Особенности технологии пайки металлическими припоями электродов газоразрядных приборов Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В.

// Электронная техника. Сер. 1, СВЧ – техника. – 2020.- вып. 3 (546). – С. 101 – 107.

А8. Создание вакуумноплотных соединений кварцевого стекла с металлами активной пайкой мягкими припоями Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Логинов В.В., Пучнина С.В // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ – техника. – 2020.- вып. 4 (547). – С. 82-89.

**Доклады на международных конференциях:**

А9. С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, С.В. Пучнина, Р.М. Ушаков. Индикатриса излучения импульсного источника УФ-излучения с U-образной конфигурацией плазменного канала. // VII Международ. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии «ЛаПлаз – 2021» / Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 204-205.

А10. Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Градов В.М. Моделирование мощных импульсных разрядов с широкодиапазонным спектральным составом излучения // IV Международ. научно-практическая конфер. «САПР и моделирование в современной электронике» / Сб. науч. трудов. – Брянск, 2020. – С. 354 -357.

А11. Математическое моделирование импульсных источников УФ-излучения с разрядами в ксеноне и криптоне, стабилизированных излучающе - поглощающей оболочкой / Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Градов В.М. и др. // Международная научно-техническая конференция. "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики"/ Сб. науч. трудов. – Воронеж, 2020. – С. 797- 801.

А12. Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В. Изменение оптических свойств легированных кварцевых оболочек импульсных ламп под воздействием излучения ксеноновой плазмы //X международ. Конф. по фотонике и информационной оптике / Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. - С. 309-310.

А13. Оптические свойства сапфира и кварцевого стекла в условиях воздействия импульсного излучения газоразрядной плазмы / С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев,

Д.Ю. Пугачев, С.В. Пучнина // Тез. докл. Международ. Конф. «Инженерные системы – 2020». / Сб. науч. трудов. – М.; РУДН, 2020. - С. 51 – 57.

- A14. Структурные исследования переходных слоев при пайке медным припоем сапфира с коваром /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, С.В. Пучнина // Сборник научных трудов Международ. Конф. «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения». - Томск, 2020. - С.22-23.
- A15. Радиационное воздействие ультрафиолетового излучения на сапфировые оболочки/ С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, М.А. Левкин и др.// Радиационная стойкость электронных систем- «Стойкость - 2010». Научно - технический сборник - М.: МИФИ, 2010.-С. 127- 128.

**Патенты на полезную модель:**

- A16. Патент РФ (полезная модель) № 103668. Газоразрядный импульсный источник высокоинтенсивного ультрафиолетового излучения. МПК H01J 61/30 /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, С.Г. Шашковский и др. // 20.04.2011, Бюл. №11.
- A17. Патент РФ (полезная модель) № 97211. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 61/00 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др. // 27.08.2010, Бюл. №2.
- A18. Патент РФ (полезная модель) №152355.Короткодуговая ксеноновая лампа для устройства оптоэлектронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. МПК H01J 61/02/ С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов и др. // 27.05.2015, Бюл. №15.
- A19. Патент РФ (полезная модель) № 97213. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 65/00 /С.В. Гавриш, В.С. Жмаев, Д.Н. Кугушев и др. // 27.08.2010, Бюл. №32.
- A20. Патент РФ (полезная модель) № 100671. Токоввод цезиевой лампы с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК H01J 61/02 /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов и др. // 20.12.2010, Бюл. №35.
- A21. Патент РФ (полезная модель) № 93582. Короткодуговая ксеноновая лампа для устройства оптико-электронного противодействия. МПК H01J 61/02 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, О.В. Шумейко // 27.04.2010, Бюл. №12.

- A22. Патент РФ (полезная модель) № 111348. Газоразрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия. МПК H01J 61/30 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др. // 10.12.2011, Бюл. №34.
- A23. Патент РФ (полезная модель) № 118045. Бортовая станция активных помех для индивидуальной защиты летательных аппаратов от управляемых ракет с инфракрасными головками самонаведения. МПК F41H 11/02, МПК F42B 5/15 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др. // 10.07.2012, Бюл. №19.
- A24. Патент РФ (полезная модель) № 88121, МПК F41H 13/00. Устройство индивидуальной защиты летательного аппарата от управляемых ракет с оптическими головками самонаведения. /С.В. Гавриш, Б.И. Желтиков, Д.Н. Кугушев и др. // 27.10.2009, Бюл. №30.
- A25. Патент РФ (полезная модель) № 123226. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 61/02 / С.В. Гавриш, Т.Н. Баринаева, Д.Н. Кугушев и др. // 20.12.2012, Бюл. №35.
- A26. Патент РФ (полезная модель) № 123226. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 61/02 / С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Т.В. Игнатова и др. // 20.12.2012, Бюл. №35.



**Акционерное общество**  
**«Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»**  
**АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»**

Введенского ул., д.3, корп.1, г. Москва, 117342  
 Телефон: (495) 333-91-44 факс: (495) 333-00-03

ОГРН 1127746646510, ИНН/КПП 7728816598/772801001  
 e-mail:bereg@niipolyus.ru, http://www.polyus.info

« 2 » 08 2021 г.

№ 500/216

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Генеральный директор,

доктор технических наук, профессор



Кузнецов Е. В.

«    »    2021 г.

М.П.

**АКТ**

**об использовании результатов диссертационной работы**  
**Кугушева Дмитрия Николаевича**  
 на тему «Разработка импульсного источника УФ излучения  
 с U – образным плазменным каналом для оптико - электронных систем  
 обеззараживания воздуха и поверхностей»  
**в разработках ОКБ «Гранат» НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха**

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Кугушева Д.Н. использованы в опытно – конструкторских работах ОКБ «Гранат» при модернизации лазерных установок оптико-электронного комплекса 30Ж6 с источником излучения на основе алюмоиттриевого граната активированного неодимом с накачкой импульсными ксеноновыми лампами.

В выполненных ОКБ «Гранат» конструкторских разработках:

1. Используются предложенные в диссертации методики исследования температурных полей газоразрядной лампы для оценки теплового состояния квантрона в лазере.
2. Проведена корректировка режимов электрического питания изделия, на основе полученных в диссертации данных о влиянии параметров разрядного контура на выходные характеристики импульсных ксеноновых ламп и лазерной установки в целом.

3. Полученные данные по пространственному распределению излучения в ИК области спектра позволили провести оптимизацию системы оптической накачки квантронов.

Внесенные усовершенствования позволили обеспечить эффективную концентрацию излучения накачки на активный элемент Nd+3:YAG, что существенно повысило эффективность работы лазера.

Начальник ОКБ «Гранат»,  
доктор технических наук,  
профессор



Жиган И. П.

Начальник отдела,  
Кандидат технических наук



Баринов С.А.

**УТВЕРЖДАЮ**  
 Генеральный директор  
 АО «КБточмаш им. А. Э. Нудельмана»  
 Академик Российской академии космонавтики  
 им. К.Э. Циолковского  
 доктор технических наук



В.Н. Слободчиков

of \_\_\_\_\_ 2021

М.П.

### АКТ

#### о внедрении результатов диссертационной работы

Кугушева Дмитрия Николаевича

«Разработка импульсного источника УФ излучения с U – образным плазменным каналом для оптико - электронных систем обеззараживания воздуха и поверхностей» в опытно – конструкторских работах АО «КБточмаш им. А. Э. Нудельмана»

Комиссия в составе начальника отдела разработки лазерной техники М.М Ильичева и ведущего инженера Н.Ф. Глущенко, ознакомившись с диссертационной работой Д.Н. Кугушева, установила, что представленные в диссертационной работе результаты:

- математического моделирования импульсного разряда с учетом ухода ксенона в заэлектродные объемы позволили определить оптимальный спектрально - энергетический состав излучения лампы и обеспечить максимальную эффективность накачки в области поглощения активной среды с АИГ:Nd<sup>3+</sup> в переносном лазерном приборе оптико-электронной системы;
- экспериментальных исследований по влиянию возвращенного собственного излучения на сопротивление плазменного канала импульсной лампы послужили основой для оптимизации отражающей системы квантрона и источника электрического питания лазерного излучателя.

Все перечисленные результаты использованы в ОКР «Карьера-2М» и позволили обеспечить соответствие эксплуатационных характеристик переносного лазерного прибора оптико-электронной системы требованиям технического задания.

Начальника отдела разработки  
лазерной техники

М.М Ильичев

Ведущий инженер,  
кандидат технических наук

Н.Ф.Глущенко



ООО «Научно-Производственное  
Предприятие «Мелитта»

Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.16/10  
Тел./факс /495/ 729-35-34, e-mail: mail@melitta-uv.ru  
<https://melitta-uv.ru/>

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор



Я.А. Гольдштейн

08 2021 г.

**Акт о внедрении результатов  
диссертационной работы Кугушева Дмитрия Николаевича  
в опытно – конструкторских работах ООО «НПП «Мелитта».**

Комиссия в составе председателя: заместителя генерального директора, главного конструктора ООО «НПП «Мелитта», кандидата технических наук С.Г. Шашковского; членов комиссии: начальника опытно – производственного цеха источников света, кандидата технических наук В.В. Логинова; начальника лаборатории источников света, кандидата технических С.В. Пучниной составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Кугушева Д.Н. «Разработка импульсного источника УФ излучения с U – образным плазменным каналом для оптико - электронных систем обеззараживания воздуха и поверхностей» **позволили впервые в России:**

- на основе расчетных и экспериментальных исследований свойств ксеноновой плазмы создать базовый вариант конструкции импульсного источника УФ излучения с U – образной конфигурацией канала.
- по результатам изучения физико - химических процессов, происходящих в элементах конструкции при их изготовлении, сформировать полный технологический цикл производства газоразрядных ламп с колпачковым токовводом.

Полученные в диссертации результаты исследований были использованы в обеспечении выполняемых в отделе источников света ОКР «Катод», ОКР «Колпачок ФК», ОКР «Модернизация» и опытно-конструкторских разработок новых установок УФ обеззараживания воздуха и поверхностей, проводимых ООО «НПП «Мелитта».

Председатель комиссии:

С.Г. Шашковский

Члены комиссии:

В.В. Логинов

С.В. Пучнина