

На правах рукописи



**Чжо Зай**

**РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ  
С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА И СНИЖЕННЫМ  
НАГРЕВОМ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Прасицкий Василий Витальевич**

Официальные оппоненты: **Ашрятов Альберт Аббясович,**  
доктор технических наук,  
доцент, заведующий базовой кафедрой  
источников света ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский Мордовский государственный  
университет имени Н.П. Огарева»

**Штокал Александр Олегович,**  
кандидат технических наук,  
ведущий конструктор сектора конструирования  
наземных систем филиала акционерного общества  
«Научно-производственное объединение имени  
С.А. Лавочкина»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»

Защита состоится «02» октября 2019 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://www.bmstu-kaluga.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук  
доцент

Лоскутов Сергей Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время натриевые лампы высокого давления (ДНаТ) являются наиболее эффективными источниками искусственного освещения и составляют половину всех источников наружного освещения. Благодаря их высокой светоотдаче, достигающей 150 лм/Вт, и спектру мощностей от 0,05 кВт до 3 кВт, они используются для парников и теплиц.

В разрядных осветительных лампах высокого давления применяют самокалывающиеся электроды. Вследствие высокой температуры и достаточно большой плотности тока, составляющей около  $10^4$  А/см<sup>2</sup>, электроды работают в тяжелом тепловом режиме. Плотность мощности, подводимая к электродам в месте «привязки» дуги, достигает  $3 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Рассеяние подобных плотностей мощности приводит к неминуемому перегреву и крайне быстрому испарению эмиссионного материала. Чтобы этого не происходило, тепло отводят к другим участкам электрода.

Геометрические размеры электродов определяются из условия необходимого компромисса между сочетанием оптимальных температур торца вольфрамового керна  $T_{ВК}$  и спирали  $T_{СП}$ , обеспечивающих наилучшие условия для конкретного типа применяемого эмиссионного вещества.

Электрод представляет собой вольфрамовый стержень (керн) с надетой двухслойной вольфрамовой спиралью. Промежутки между витками спирали, а иногда и пространство между керном и спиралью, заполняется эмиссионным (эмиссионно-активным) веществом, в качестве которого используются оксиды, цирконаты, вольфраматы щелочноземельных, а также оксиды редкоземельных металлов.

Сpirальные электроды имеют несколько существенных недостатков.

Во-первых, количество активного вещества ограничивается возможностью механической адгезии к поверхности вольфрамовой спирали и на практике находится на уровне порядка 2,5 мг. Вследствие различных коэффициентов термического расширения вольфрама и активатора происходит разрушение и осыпание последнего в результате жестких термоциклов при включении и выключении лампы.

Двухслойная спираль, надетая на керн, имеет очень малую и, в общем случае, существенно изменяющуюся площадь контакта как с керном, так и между собственными соседними витками. Поэтому наблюдается существенный градиент температуры по длине электрода, достигающий нескольких сотен градусов и изменяющийся от образца к образцу.

Неоптимальное распределение температуры по электроду на стадии дугового разряда приводит к ускоренному испарению активатора, снижая долговечность лампы, а также световой поток.

Одним из способов увеличения долговечности лампы при снижении ее себестоимости является применение спеченных электродов, обладающих набором характеристик, отсутствующих у серийно применяемых в мировой практике спиральных электродов с нанесенным на их поверхность

микрослоем эмиссионно-активного вещества. Среди потенциальных преимуществ спеченного электрода – увеличенное в 5-10 раз количество эмиссионно-активного вещества, его объемное расположение, повышенная эмиссионная способность и более низкая рабочая температура.

Таким образом, параметры натриевых ламп в решающей степени определяются качеством примененных электродов. Физико-технологические основы разработки термоэлектронных композиционных электродов на основе новых материалов для натриевых ламп высокого давления пока не сформулированы. Это объясняется многообразием разнородных физических процессов взаимодействия плазмы тлеющего и дугового разрядов с композиционной поверхностью электрода, и недостаточным количеством комплексных теоретических и экспериментальных исследований в данной области, на базе которых стала бы возможной разработка инженерных методов расчета и контроля параметров электродов.

Поэтому данная диссертационная работа, направленная на проведение ряда исследований в областях физики как конденсированного состояния, так и радиационного взаимодействия плазмы с поверхностью твердого тела, результаты которых будут положены в основу разработки новых технологических способов изготовления электродов с оптимальным составом эмиссионно-активного вещества, является весьма важной и актуальной.

**Степень разработанности темы диссертации.** Диссертационная работа является расширением подходов к проблеме повышения долговечности и надежности термоэлектродов дуговых натриевых ламп высокого давления. В создание и совершенствование термоэлектродов внесли значительный вклад отечественные ученые: Г.Н. Рохлин, С.П. Решенов, И.Ф. Минаев, А.П. Коржавый, В.И. Капустин, В.И. Кристя. Из зарубежных ученых весьма существенный вклад в развитие теории и практики разрядных ламп наряду с другими внесли работы J.F. Waymouth.

Вопросы создания конструкции спиральных термоэлектродов достаточно подробно освещены в работах Г.Н. Рохлина и J.F. Waymouth.

Так С. П. Решенов предложил использовать пористый резервуар из спеченного тугоплавкого порошка, заполненный активно-эмиссионным веществом вместо вольфрамовой спирали. Развитие этой идеи осуществлено В.В. Прасицким и Р.И. Хабибулиным. Применение оригинального эмиссионно-активного вещества позволило создать спеченный термоэлектрод для разрядных ламп высокой интенсивности, имеющими мощности от 125 Вт до 600 Вт. Электроды обеспечивали повышение долговечности осветительных ламп высокой интенсивности в полтора раза: ртутных ламп – до 12 тысяч часов и натриевых ламп – до 18 тысяч часов. Таким образом, концепция применения спеченных электродов получила практическое подтверждение. Однако при этом остался ряд нерешенных научно-технических и технологических вопросов.

**Основная цель работы** – создание нового поколения спеченных электродов, способных в дальнейшем повысить срок службы натриевых разрядных ламп высокого давления за счет сниженной скорости расходования

активно-эмиссионного вещества и уменьшения распыления поверхности электродов в течение переходных процессов между тлеющей и дуговой формами разряда. При этом увеличение долговечности ламп снизит материальный и технологический ущерб от их утилизации.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка математической модели двухслойного термоэлектрода;
- теоретические исследования тепловых режимов спеченных электродов в условиях дугового разряда при помощи разработанной математической модели;
- исследование возможности снижения распыляющего воздействия высокоэнергетичных частиц;
- исследование взаимодействия поверхности электрода с распыляющими ионами в тлеющем разряде;
- экспериментальное изучение температурных полей двухслойных спеченных электродов в условиях взаимодействия с разрядной плазмой;
- разработка способов изготовления двухслойных спеченных электродов с целью достижения необходимой теплоотводящей структуры;
- испытание разработанных двухслойных спеченных электродов в составе натриевых ламп высокого давления.

### **Основные научные цели работы.**

1. Разработка спеченных электродов для натриевых разрядных ламп высокого давления, обладающих физическими характеристиками, обеспечивающими ресурс работы ламп на уровне, превышающем 30 тысяч часов.

При этом должны быть определены и разработаны методики исследований и аналитическое оборудование.

### **2. Исследование:**

- зависимостей распределения температуры по поверхности электрода от теплопроводности применяемых материалов и конструктивных параметров;
- физических процессов и характеристик электродных материалов, определяющих условия перехода разряда из тлеющей в дуговую стадию;
- взаимосвязи светотехнических параметров натриевых ламп высокого давления и параметров примененных в них спеченных электродов.

**Научная новизна полученных результатов.** В ходе выполнения диссертационной работы были впервые получены следующие результаты:

- разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать температуру области взаимодействия поверхности электрода с разрядом в зависимости от геометрии и тепловых параметров применяемых материалов;
- определён фазовый состав эмиссионно-активного вещества, обеспечивающий получение долговечности натриевых ламп высокого давления на уровне 30 тысяч часов, представляющий собой смесь  $Ba_2CaWO_6$  и  $BaAl_2O_4$  при массовом отношении 2:1;
- определена теплопроводность спеченной части термоэлектрода, содержащей эмиссионно-активное вещество, в зависимости от концентрации последнего, составляющая 21 – 32 Вт/м·К при рабочей температуре;

- определена теплопроводность спеченной части термоэлектрода, используемая в качестве теплоотводящего слоя, составляющая 95 – 110 Вт/м·К при рабочей температуре;

- установлено, что применение в разработанном термоэлектроде теплоотводящего слоя позволяет снизить температуру поверхности в области взаимодействия с разрядом на 50...100 К.

**Практическая значимость работы.** Результатом проведенных исследований явилась разработка нового поколения спеченных термоэмиссионных электродов для дуговых разрядных натриевых ламп высокого давления.

Применение разработанных электродов позволило:

- увеличить средний ресурс ламп до 30000 часов;

- уменьшить падение светового потока в течение срока службы с 20 % до 13 %;

- уменьшить расходы на утилизацию отработавших ламп.

Результаты работы внедрены в производство спеченных электродов на ООО «Калужские лампы».

**Методология и методы исследования.** Методологической основой диссертации служит комплекс теоретических и экспериментальных методов исследований, направленных на выяснение взаимозависимостей между конструктивными параметрами спеченных электродов, распределением температуры по их поверхности, энергии распыляющих частиц разрядной плазмы и скорости испарения эмиссионно-активного вещества.

Для измерения фазового состава эмиссионно-активного вещества использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-1УМ. Для исследования структуры образцов использовался метод металлографического анализа: изготовленные микрошлифы анализировались по фотографиям, полученным на оптическом микроскопе МИМ-7. Исследование тепловых характеристик производилось при помощи оригинального оборудования, созданного с применением оптической пиromетрии и установки измерения теплопроводности.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Разработанная математическая модель, позволяющая рассчитывать температуру области взаимодействия поверхности электрода с разрядом в зависимости от геометрии и тепловых параметров применяемых материалов;

2. Результаты исследований температурных зависимостей поверхности однослойных и двухслойных электродов от теплопроводности спеченного тела;

3. Спеченный электрод с теплоотводящей подложкой, обеспечивающей снижение температуры поверхности в области взаимодействия с разрядом на 50...100 К;

4. Спеченный электрод с эффектом полого катода.

**Достоверность полученных экспериментальных результатов** обеспечивается применением апробированных средств измерения, методов контроля и согласием с результатами, полученными другими авторами, работающими в аналогичных областях исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XLVI Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2016 г.), XLIX-L Международной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии» (Москва, 2017 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (Калуга, 2017 г.), Региональных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (Калуга, 2016 г., 2017 г., 2018 г.), XVIII Российской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления» (Калуга, 2019 г.), XX Международной научно-практической конференции «Достижения в области науки и техники» (Москва, 2019 г.).

**Публикации.** Основные результаты, полученные в работе, опубликованы в 11 печатных трудах, в том числе 2 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследований получены автором диссертации в процессе научной деятельности. Разработана математическая модель двухслойного электрода, позволяющая рассчитывать температурные условия функционирования электрода. Проведены исследования и определены оптимальные способы изготовления двухслойных спеченных электродов. Экспериментально исследованы температурные зависимости поверхности однослойных и двухслойных электродов в различных режимах разряда, а также параметры натриевых ламп высокого давления с разработанными спеченными электродами. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, теоретических и экспериментальных исследованиях, а также формировании научных положений и выводов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Её общий объем составляет 114 страниц, включая 45 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 109 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности; сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость результатов работы, основные положения, выносимые на защиту; изложены методология и методы диссертационного исследования, степень достоверности и апробация результатов работы.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу литературных данных о современном состоянии проблем, связанных с работами по усовершенствованию термоэлектродов для современных натриевых разрядных ламп высокой интенсивности. Установлено, что при их изготовлении и разработке большей частью не учитывается комплексный характер влияния на основные параметры электрода условий его изготовления, исследование основных ха-

рактеристик зачастую проводятся в условиях, не соответствующих условиям их эксплуатации в приборах. Не определены также закономерности, связывающие основные характеристики электродов с параметрами всех этапов технологического процесса их изготовления. Отсутствует научный подход к определению состава активно-эмиссионного вещества электродов, свидетельством чего является его значительное разнообразие у разных производителей. Способ закрепления эмиссионно-активного вещества на спиральном электроде не позволяет увеличить его количество, что ограничивает долговечность ламп. Сложившаяся ситуация с качеством электродов может быть существенно улучшена путем применения в производстве ламп спеченных электродов, способных обеспечить повышенную до 25 – 30 тысяч часов долговечность, соответствующую современным требованиям экологии окружающей среды и ресурсосбережения.

Обоснована перспективность и актуальность работ, связанных с исследованием спеченных электродов, включающим создание нового вида эмиссионно-активного вещества и конструктивных особенностей спеченных электродов, сформулированы задачи, решение которых позволит создать спеченные электроды для натриевых ламп высокого давления, имеющих долговечность на уровне 30 тысяч часов.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию возможности снижения температуры эмиттирующей части спеченного электрода и распыляющего воздействия высокоэнергетичных частиц.

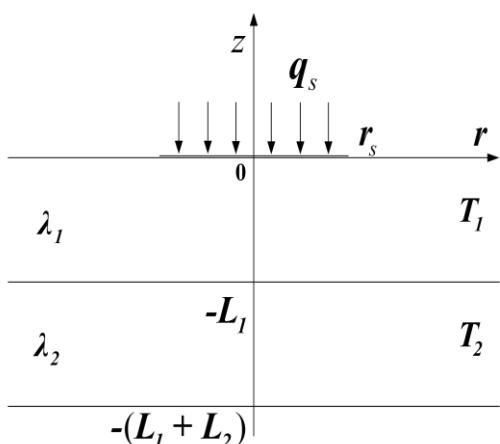


Рис. 1. Геометрия двухслойного катода

В первом разделе разработка и исследование математической модели двухслойного термоэлектрода, функционирующего в режиме катода. Рассмотрен плоский двухслойный катод газоразрядного прибора, на часть верхней поверхности которого, имеющую форму окружности радиуса  $r_s$  (катодное пятно), падает тепловой поток, плотность которого  $q_s$  постоянна по пятну. Так как обычно вся тепловая мощность, выделяемая в катодном слое разряда, отводится через катод, то  $q_s = jU_c$ , где  $j$  – плотность разрядного тока,  $U_c$  – катодное падение напряжения разряда. Поскольку во многих случаях радиус катодного пятна мал по сравнению с характерным размером катода, при моделировании теплопереноса в области пятна можно считать поперечные размеры катода неограниченными. Пусть ось  $z$  направлена перпендикулярно поверхности катода, которая расположена в плоскости  $z = 0$ , в то время как его нижняя граница расположена в плоскости  $z = -(L_1 + L_2)$ , а граница между слоями – в плоскости  $z = -L_1$ , где  $L_1$  и  $L_2$  – толщины слоев (Рис. 1.).

Температура в центре пятна определяется выражением

$$T(0,0) = \frac{q_s r_s}{\lambda_1} \times \\ \times \left[ 1 - 2 \int_0^{\infty} \frac{\exp(-t)[(\lambda_1 + \lambda_2)\exp(-tL_2/L_1) - (\lambda_1 - \lambda_2)]}{(\lambda_1 + \lambda_2)[1 + \exp(-t - tL_2/L_1)] - (\lambda_1 - \lambda_2)[\exp(-t) + \exp(-tL_2/L_1)]} \frac{J_1(r_s t / 2L_1)}{t} dt \right] + T_0, \quad (1)$$

в котором несобственный интеграл может быть вычислен с использованием квадратурной формулы.

При  $\lambda_1 = \lambda_2$

$$T_s = T_0 + \frac{q_s r_s}{\lambda_1} \int_0^{\infty} \operatorname{th}[p(L_1 + L_2)] \frac{J_1(r_s p)}{p} dp. \quad (2)$$

В случае однослоиного катода, т.е. при  $L_2 = 0$

$$T_s = T_0 + \frac{q_s r_s}{\lambda_1} \int_0^{\infty} \operatorname{th}(pL_1) \frac{J_1(r_s p)}{p} dp. \quad (3)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – теплопроводности материалов верхнего и нижнего слоев,  $T_0$  – температура внешней поверхности катода.

В предельном же случае  $L_1 \rightarrow \infty$  формула (3) принимает вид

$$T_s = T_0 + \frac{q_s r_s}{\lambda_1} \int_0^{\infty} \frac{J_1(r_s p)}{p} dp = T_0 + \frac{q_s r_s}{\lambda_1}, \quad (4)$$

что совпадает с известным выражением для температуры в центре разрядного пятна на катоде, размеры которого намного превосходят радиус пятна.

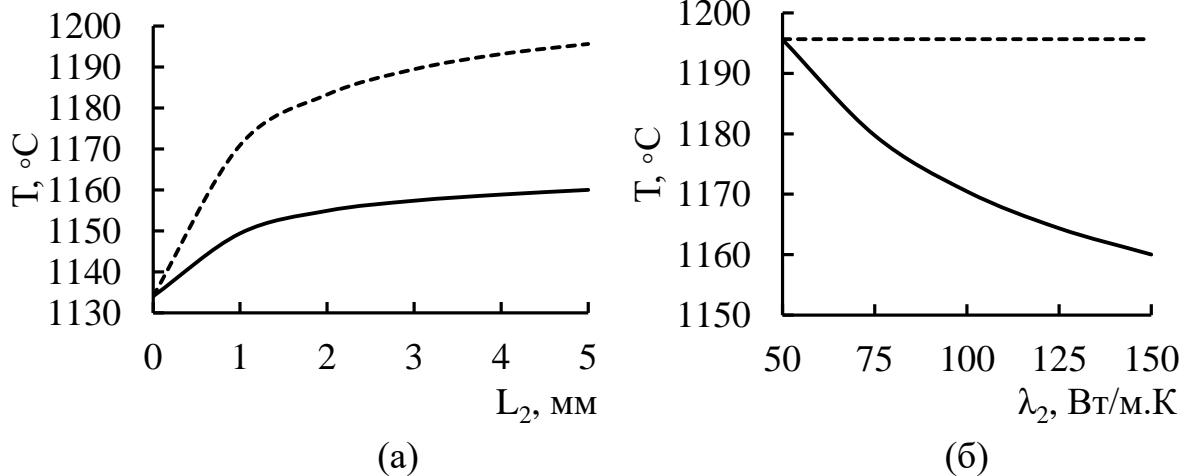


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности катода от толщины подложки (а) и от теплопроводности подложки (б)

Расчеты проводились для разряда при радиусе пятна  $r_s = 1,8 \cdot 10^{-4}$  м,  $q_s = 3,3 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> и  $L_1 = 1$  мм,  $\lambda_1 = 50$  Вт/м·К. На Рис. 2, а, сплошной линией приведена рассчитанная из (1) зависимость температуры катода  $T_s$  в центре разрядного пятна от толщины его подложки  $L_2$  при  $\lambda_2 = 150$  Вт/м·К, а на Рис. 2, б – зависимость  $T_s$  от теплопроводности подложки  $\lambda_2$  при  $L_2 = 5$  мм.

Штриховыми линиями изображены соответствующие зависимости для однослоиного катода с теплопроводностью  $\lambda_l = 50 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$  и толщиной  $L_l$ , совпадающей с толщиной двухслойного катода, найденные из выражения (3). Из них видно, что двухслойная конструкция электрода в случае, когда его подложка имеет достаточно большую теплопроводность, может обеспечить существенно меньший нагрев эмиссионной поверхности катода в разряде.

Во втором разделе проведено исследование возможности снижения распыляющего воздействия высокогенеретичных частиц посредством применения конструкции электрода, реализующей эффект «полого катода». Сниженное напряжение горения тлеющего разряда вследствие эффекта «полого катода» на стадии перехода его в дуговой обеспечивает существенное увеличение срока службы электрода. Эксперименты, проведенные в процессе выполнения работы, показали, что, для того, чтобы осуществился эффект «полого катода», в конструкции спеченного электрода должны быть предусмотрены две поверхности, отстоящие друг от друга на расстоянии, меньшем двойной длины катодного падения  $d_k$ , т.е., меньшем 0,42 мм.

Полученный результат согласуется с исследованиями авторов работы, показавших, что уменьшение диаметра отверстия в полом катоде до 100 мкм позволяет расширить рабочий диапазон до атмосферного давления.

**Третья глава** диссертации посвящена разработке способов изготовления экспериментальных образцов спеченных термоэлектродов. Спеченный электрод для разрядной лампы высокого давления представляет собой вольфрамовый стержень, на котором закреплена пористая вольфрамовая матрица, поры которой заполнены эмиссионно-активным веществом. При этом спеченная часть состоит из трех областей: область с эмиссионно-активным веществом; область без активного вещества (теплоотводящая подложка); область с активным веществом, отстоящая от подложки на расстоянии, обеспечивающим эффект полого катода.

Это значит, что в процессе изготовления электрода должны присутствовать следующие основные операции: изготовление кернов; синтез эмиссионно-активного вещества; смешивание порошков вольфрама и эмиссионно-активного вещества; приготовление шихты или шликера; формообразование (прессование, экструзия); удаление пластификатора; спекание.

Чистые металлические катоды не обеспечивают одновременно выполнения двух необходимых условий: низкой работы выхода и малой упругости паров при рабочей температуре. Удовлетворительные результаты достигаются только при использовании составов из окислов щелочноземельных металлов.

В диссертационной работе в качестве эмиссионно-активного вещества использовался комбинированный состав  $\text{Ba}_2\text{CaWO}_6 + \text{BaAl}_2\text{WO}_4$ , получаемый термическим синтезом. Экспериментально определенные режимы процесса синтеза эмиссионно-активного вещества следующие: давление прессования 18-20 МПа; синтез в течение 8 часов при температуре 1650 – 1700 К.

Разработанная в диссертации схема приготовления шихты выглядит следующим образом: отвешивание требуемых количеств активно-эмиссионного вещества, вольфрамового порошка и пластификатора; смешивание исходных компонентов в эксцентриковых барабанах в течение 6 часов при скорости вращения 40 – 60 оборотов в минуту; просеивание полученной смеси через сито с размером ячейки 0,32 мм.

Прессование осуществляется в стальной пресс-форме, состоящей из следующих функциональных элементов (Рис. 3, а): матрица, верхний и нижний пуансоны, упор. Назначение упора – удержание керна в заданном положении. Процесс прессования заготовки осуществляется по следующей схеме. На первом этапе (Рис. 3, а) в матрицу загружается шихта для изготовления элемента полого катода.

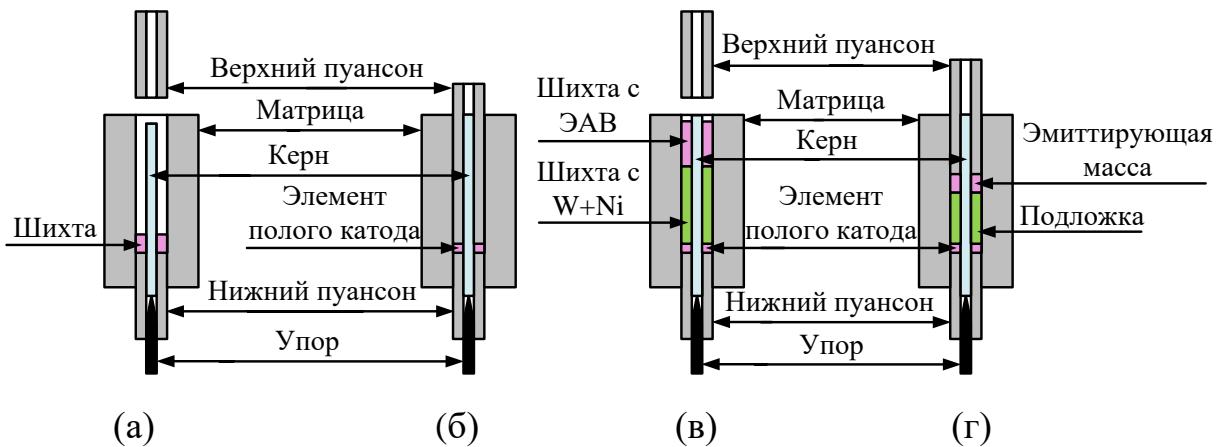


Рис. 3. Процессы прессования заготовок электродов: загрузка шихты для прессования элемента полого катода (а), прессование элемента полого катода (б), пресс-форма с загруженной шихтой материала подложки и материала с активно-эмиссионным веществом (в) и спрессованная заготовка электрода в пресс-форме (г)

Движением верхнего пуансона происходит уплотнение шихты. Полученный линейный размер элемента определяется давлением прессования и количеством загруженной шихты (Рис. 3, б).

После завершения прессования элемента верхний пуансон выводится из матрицы, после чего в нее последовательно загружается шихта из материала теплоотводящей подложки и материала с эмиссионно-активным веществом, как показано на Рис. 3, в.

Снова прикладывается усилие к верхнему пуансону и производится прессование загруженной шихты. Спрессованная заготовка термоэлектрода, находящаяся в пресс-форме, показана на Рис. 3, г. После окончания прессования нижний пуансон осуществляет движение вверх в матрице, и заготовка выталкивается из пресс-формы.

Экспериментально установлено, что при давлении прессования, равном 100 – 110 МПа пористость прессовки составляет 55-60 %. Так же установлено, что при последующем спекании при температуре 1850 К происходит ли-

нейная усадка порошковой части заготовки электрода. При этом коэффициент усадки составляет около 0,1. Это значит, что после спекания длина каждого участка спеченной массы уменьшится на 0,1 от исходного линейного размера.

При разработке процесса прессования было учтено следующее, экспериментально обнаруженное явление. Если в матрицу последовательно загрузить шихту с активно-эмиссионным веществом и без него, после чего произвести прессование, то после спекания получится единое спеченное тело. Если же спрессовать первую шихту, а после этого загрузить вторую и снова произвести прессовку, то после спекания получится два отдельных тела.



Рис. 4. Схема изготовления экспериментальных образцов спеченных электродов

высокотемпературной водородной печи TOB-DSP-VF17Q. Для удаления поглощенного водородом водорода применяется операция вакуумного отжига.

Таким образом, схема изготовления образцов спеченных электродов имеет вид, представленный на Рис. 4.

**В четвертой главе** приведены результаты исследование физико-технических характеристик усовершенствованных термоэлектродов для натриевых разрядных ламп.

В первом разделе описаны результаты исследования характеристик эмиссионно-активного вещества. В настоящей работе в качестве

Именно поэтому элемент полого катода и остальная часть шихты прессуются в два этапа. Усаживаясь в процессе спекания симметрично относительно положения на керне, они образуют требуемый для осуществления эффекта полого катода зазор.

Из изготовленных на предыдущих операциях шихты и кернов на операции прессования формируются заготовки электродов необходимой формы и размеров. Поскольку в спрессованной массе присутствует пластификатор, наличие которого в готовом изделии недопустимо, то возникает необходимость его удаления. Удаление пластификатора обеспечивается прогревом в среде водорода на водородной печи MXG1200-40S. Экспериментально найденный режим удаления пластификатора: выдержка в течение 1,5 часа при температуре 1100 К. Для обеспечения механической прочности производится высокотемпературное спекание, которое также проводится в восстановительной среде водорода. При температурах порядка 1900 К спеченные частицы вольфрама и эмиссионно-активного вещества образуют прочную массу, надежно фиксирующуюся на керне. Спекание производится на

эмиссионно-активного вещества использовался проверенный состав, включающий вольфраматы бария-кальция и вольфрамат алюминия. Синтез осуществлялся в соответствии со схемой, приведенной в Главе 3. Исследование фазового состава производилось с применением рентгеновского дифрактометра типа ДРОН.

Разрядный ток аномального тлеющего разряда должен обеспечивать разогрев электрода до температуры появления термоэмиссии. В связи с этим, вольтамперные характеристики, измеренные в пределах параметров питающей сети от момента зажигания тлеющего разряда до его перехода в дуговой, дают исчерпывающую информацию о пригодности того или иного материала в качестве эмиссионного.

В качестве показателя, характеризующего эмиссионную способность активного вещества, использовалось значение напряжения на разрядном промежутке при заданной величине разрядного тока. Для этой цели производилось измерение тока и напряжения горения разряда исследуемых образцов электродов в горелках. Построенные по результатам измерений ВАХ для различных материалов приведены на Рис. 5.

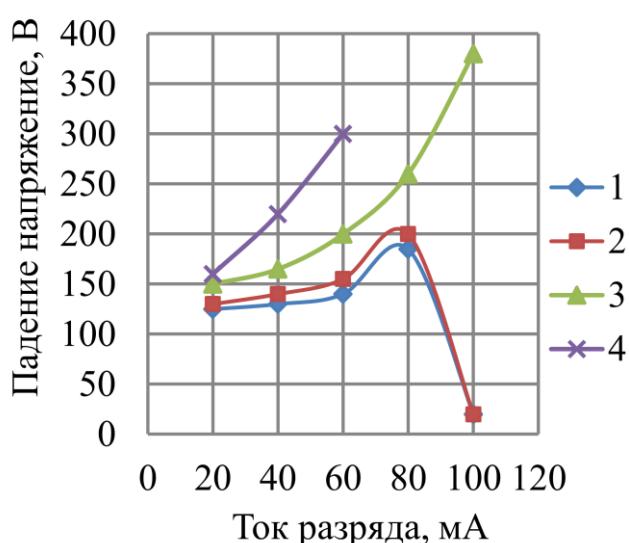


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики разряда с различным активно-эмиссионным веществом:  
1 –  $\text{Ba}_2\text{Ca}\text{WO}_6 + \text{BaAl}_2\text{O}_4$ ;  
2 –  $\text{Ba}_2\text{Ca}\text{WO}_6$ ; 3 –  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ; 4 – W

Во втором разделе описаны результаты исследования теплопроводности спеченной части термоэлектрода с эмиссионно-активным веществом. Экспериментальное исследование теплопроводности используемого в диссертации материала производилось при температуре 380 К. Полученные данные пересчитывались на рабочую температуру электрода (1400 К). Полученная зависимость теплопроводности от концентрации активно-эмиссионного вещества представлена на Рис. 6.

Как следует из рисунков, использование в качестве эмиссионных материалов  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и W не обеспечивают переход в дуговой разряд даже при напряжениях, превышающих 300 В. Применение  $\text{Ba}_2\text{Ca}\text{WO}_6$  и  $\text{BaAl}_2\text{O}_4$ , взятых отдельно, дает существенно лучшие результаты, но полностью соответствует требованиям к минимальному напряжению композиционный состав типа  $\text{Ba}_2\text{Ca}\text{WO}_6 + \text{BaAl}_2\text{O}_4$ .

В качестве компонентов для синтеза наиболее эффективного активно-эмиссионного вещества в диссертационной работе использовались карбонаты бария и кальция, а также гидрооксид алюминия и триоксид вольфрама.

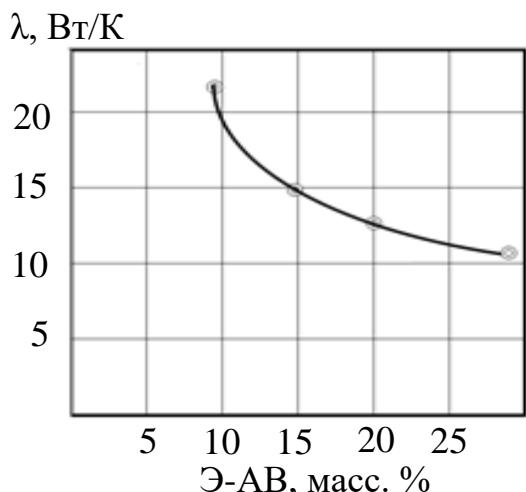


Рис. 6. Зависимость теплопроводности от концентрации эмиссионно-активного вещества

ногого никеля не превышает 0,05 %. При этом пористость материала подложки составила  $7 \pm 2 \%$ . Зависимость теплопроводности от температуры приведена на Рис. 7. Таким образом, при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  теплопроводность материала подложки почти на порядок превышает теплопроводность спеченной части термоэлектрода, в которой размещено эмиссионно-активное вещество.

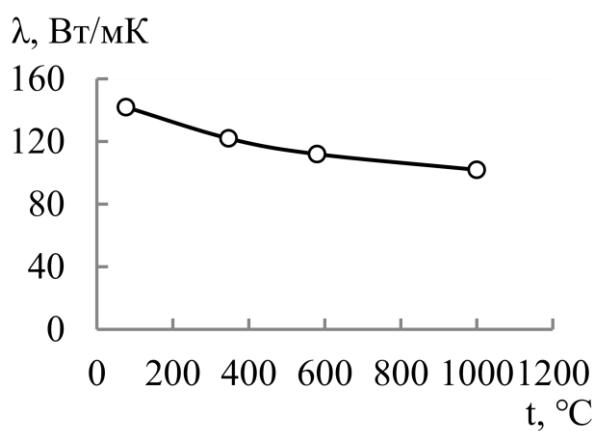


Рис. 7. Зависимость теплопроводности материала подложки от температуры

получим:  $d_k = 0,7(8,86 \cdot 10^{-12} / 0,9 \cdot 10^3)^{0,5} (21,67 \cdot 10^{-19} / 67 \cdot 10^{-27})^{0,25} 200^{0,785} = 0,21 \text{мм.}$

Где:  $U_k$  – катодное падение напряжения, В;  $m_i$  – масса иона;  $J_+$  – плотность ионного тока, А/м<sup>2</sup>;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная свободного пространства. Итак, для возникновения эффекта «полого катода», в конструкции спеченного электрода, изготовленного с применением предлагаемого в диссертации эмиссионно-активного вещества, были предусмотрены две поверхности, отстоящие друг от друга на расстоянии, меньшем 0,4 мм.

В работе были сняты вольт-амперные характеристики переходного процесса тлеющий разряд – дуговой разряд при использовании электродов, как

В третьем разделе описаны результаты исследования теплопроводности спеченной подложки. Как следует из Рис. 6, пористость материала подложки должна находиться на уровне 5 – 10 %. В качестве материала подложки использовался вольфрам.

Для требуемой пористости при температурах, характерных для изготовления спеченного электрода (1700–1750 К), применялось активированное спекание путем добавления мелкодисперсного никеля в вольфрамовый порошок. Проведенные исследования показали, что достаточная массовая концентрация мелкодиспер-

сий никеля не превышает 0,05 %. При этом пористость материала подложки составила  $7 \pm 2 \%$ . Зависимость теплопроводности от температуры приведена на Рис. 7. Таким образом, при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  теплопроводность материала подложки почти на порядок превышает теплопроводность спеченной части термоэлектрода, в которой размещено эмиссионно-активное вещество.

В четвертом разделе определены условия существования эффекта полого катода в предлагаемом термоэлектроде. Учитывая, что переход от тлеющего разряда к дуговому происходит при плотности разрядного тока на уровне  $0,9 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$ , а холодное давление буферного газа составляет в большинстве случаев около 2600 Па., находим длину катодного падения напряжения в тлеющем разряде при зажигании натриевой лампы высокого давления. Подставив их в выражение

$$d_k = 0,7(\epsilon_0 / J_+)^{0,5} (2e / m_i)^{0,25} U_k^{0,785},$$

с «эффектом полого катода», так и без него. Вольт-амперная характеристика разряда в переходном процессе показана на Рис. 8.

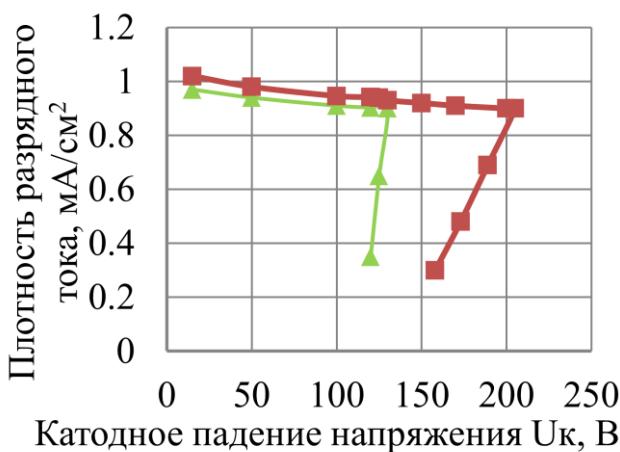


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика разряда в переходном процессе (треугольник – с эффектом полого катода)

ОПИР, а для визуализации результатов – цифровая камера. Для нахождения температуры электрода в катодном режиме напряжение питания подавалось через двухполупериодный выпрямитель.

В этом случае один из электродов постоянно выполнял функцию катода, а другой – анода. Фотография электрода, работающего в режиме катода, представлена на Рис. 9, а. На ней отчетливо видно катодное пятно, на котором сосредоточена энергия, идущая на разогрев электрода

Как следует из Рис. 9, б, керн и прилегающая к нему область спеченного электрода нагреваются до более высоких температур, чем в катодном режиме. При этом разряд горит на выступающий торец керна.

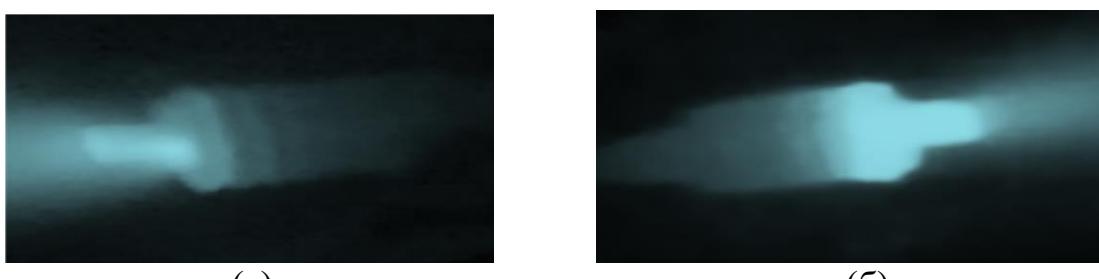


Рис. 9. Фотография термоэлектрода в катодном режиме (а) и в анодном режиме (б)

Усредненные результаты по 10 измерениям представлены на Рис. 10. По результатам анализа этих результатов можно заключить, что температура наиболее нагретой части спеченной массы, содержащей эмиссионно-активное вещество, у двухслойного электрода в среднем на 90 К ниже, чем у однослоиного.

Линия, обозначенная треугольником, показывает изменение тока разряда от напряжения для электрода с эффектом «полого катода». Переход тлеющего разряда в дуговой в этом случае происходит при катодном падении, равном 125-133 В. При использовании электрода, не обеспечивающего эффект «полого катода», падение напряжения перехода на 70-80 вольт больше.

В пятом разделе описаны результаты исследования распределения температуры по поверхности термоэлектродов. Для измерения температуры электрода использовался оптический пирометр типа

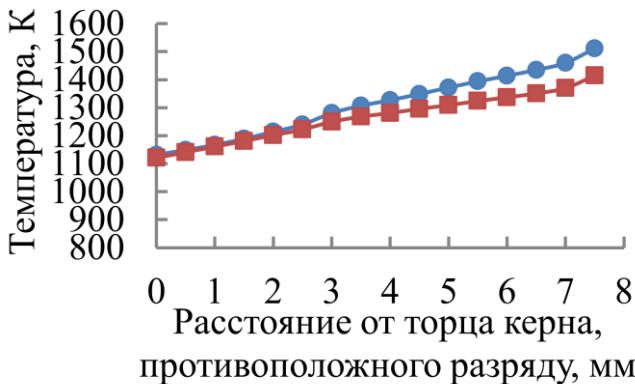


Рис. 10. Усредненные результаты измерения температуры поверхности однослойных и двухслойных спеченных электродов

Измерения, проведенные в диссертации, показывают, что в конкретном случае натриево-ртутного разряда в осветительной лампе высокого давления суммарная температура электрода, определяемая катодным и анодным периодами работы, превышает температуру катодного периода на 120-140 К.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Срок службы натриевых ламп высокого давления в значительной степени зависит от долговечности термоэлектродов, которая, в свою очередь, определяется снижением эмиссионных свойств электродов. В случае применения спеченных термоэлектродов повышение их долговечности вполне посильная задача. Эта задача, в конечном счете, сводится к увеличению начального количества и последующему сохранению запаса эмиссионноактивного вещества в электроде.

В диссертационной работе теоретическими и экспериментальными методами исследованы электрофизические характеристики и структура спеченных двухслойных термоэлектродов, определена возможность их применения в качестве электродов разрядных натриевых ламп высокого давления. При этом были решены следующие задачи.

- Предложенная математическая модель, позволяющая рассчитать тепловой режим двухслойного катода (электрода, работающего в катодном режиме) в разряде, и найдено аналитическое выражение для температуры поверхности катода в центре разрядного пятна.

- Теоретически исследована зависимость температуры поверхности катода от толщины и теплопроводности подложки и показано, что при использовании подложки с теплопроводностью 100-120 Вт/м·К температура эмиттирующей поверхности может быть снижена на 10-14%.

- Установлено, что катодное падение напряжения в случае применения электрода, в котором реализован эффект «полого катода», требуемый уровень плотности разрядного тока, при котором происходит переход разряда в дуговую стадию, обеспечивается при пониженном на 70-80 вольт катодном падении напряжения. Это обеспечивает уменьшение скорости потерь массы катодного материала на 20-30%. Показано, что в условиях, типичных для натриевых ламп высокого давления, возможно существования эффекта «полого катода», если расстояние между разделенными участками электрода находится на уровне 0,2 мм.

- Установлено, что максимальная температура двухслойного спеченного электрода на 50К...70 К ниже, чем у однослойного. При температуре элек-

трова 1439 К скорость испарения источника электронной эмиссии – оксида бария, входящего в состав полупроводящей массы щелочноземельных окислов, находящихся в порах спеченного вольфрамового каркаса, в 1,58 раз больше, чем при 1418 К. Таким образом, снижение температуры эмиссионной поверхности двухслойного спеченного электрода позволит увеличить время использования эмиссионно-активного вещества, тем самым увеличивая ресурс лампы.

5. Установлено, что в спеченном электроде с эффектом «полого катода» катодное падение напряжения на 70...80 В ниже, чем у электрода с тем же составом эмиссионно-активного вещества, не обладающего указанным эффектом.

6. При помощи модернизированной установки рентгенофазового анализа ДРОН-УМ1 исследован фазовый состав активно-эмиссионного вещества, изготовленного в соответствии с разработанной технологической схемой. Установлено, что применение в качестве пластификатора водного раствора поливинилового спирта приводит к появлению в составе эмиссионно-активного вещества паразитных фаз. Установлено, что применение в качестве пластификатора мелкодисперсного порошка стеарата кальция обеспечивает сохранность исходного фазового состава эмиссионно-активного вещества.

7. Установлено, что изменение фазового состава эмиссионного вещества в случае двухслойного электрода происходит в несколько раз медленнее. Показано, что общий ресурс работы натриевых разрядных ламп, укомплектованных двухслойными спеченными электродами, повышается до 30 – 32 тысяч часов.

Разработанные в диссертации подходы к уменьшению температуры термоэмиссионного электрода в области катодного пятна и снижению энергии распыляющих эмиссионную поверхность частиц могут быть использованы для дальнейшего совершенствования электродов. Например, исследование возможности применения эффекта «полого катода» в дуговом разряде может обеспечить расположение катодного пятна внутри организованной в термоэлектроде полости, что дополнительно уменьшит испарение эмиссионного вещества.

Разработанные в диссертации термоэлектроды прошли успешную экспериментальную проверку и внедрены в производство натриевых ламп высокого давления мощностью от 250 Вт до 1 кВт в ООО «Калужские лампы», что подтверждено соответствующим Актом.

#### **Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:**

1. Расчет температуры композиционного электрода в нормальном тлеющем разряде / Кристия В.И., Прасицкий В.В., Чжо Зай [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21, № 8. С. 59-63 (0,31 п.л./ 0,08 п.л.).

2. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Усовершенствование спеченных термоэлектродов натриевых ламп высокого давления // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21, № 10. С. 60-64 (0,31 п.л./0,15 п.л.).

3. Расчет нагрева поверхности композиционного электрода в катодном пятне нормального тлеющего разряда / Кристя В.И., Прасицкий В.В., Чжо Зай [и др.] // Тезисы докладов XLVI Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 2016. С.21 (0,06 п.л./0,01 п.л.).

4. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Параметры датчиков холла как максимальная мощность рассеяния входное и выходное сопротивления датчика // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга, 2016. Т. 1. С. 105-108 (0,25 п.л./0,12 п.л.).

5. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Усовершенствование электрода натриевой лампы высокого давление // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга, 2016. Т. 1. С. 120-122 (0,18 п.л./0,09 п.л.).

6. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Электрод газоразрядной лампы // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга, 2016. Т. 1. С. 123-126 (0,25 п.л./0,12 п.л.).

7. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Способы изготовления активно-эмиссионного вещества // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии: Материалы XLIX-L Международной научно-практической конференции. М.: Интернаука, 2017. № 1-2(36). С 26-29 (0,25 п.л./0,12 п.л.).

8. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Анализ применяемых конструкций термоэлектролов для натриевых разрядных ламп // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга, 2017. Т. 1. С. 76-78 (0,18 п.л./0,09 п.л.).

9. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Функционирование термоэлектрода натриевой лампы высокого давления в условиях дугового разряда // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Калуга, 2017. Т. 1. С. 127-129 (0,18 п.л./0,09 п.л.).

10. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Способы повышения долговечности электролов для натриевых ламп высокого давления // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы региональной научно-технической конференции. Калуга, 2018. Т. 1. С. 120-122 (0,18 п.л./0,09 п.л.).

11. Прасицкий В.В., Чжо Зай. Расчет потерь оксида бария в массе на 1 см<sup>2</sup> эмиссионной поверхности электрода натриевой лампы высокого давления // Достижения в области науки и техники: XX Международной научно-практической конференции. М.: Изд. «Актуальность.РФ», 2019. Ч. 1. С 67-68 (0,12 п.л./0,06 п.л.).

Чжо Зай

Разработка термоэмиссионных электродов с эффектом полого катода и  
сниженным нагревом в катодном пятне

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.07.2019 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1.  
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе  
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана  
248600, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, тел. (4842) 57-31-87