

Государственное научное учреждение  
«Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси»

УДК 537.533.3 : 621.3.032.26

**ПЕТРОВИЧ Ольга Николаевна**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Минск 2012

Работа выполнена в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научный руководитель: **ГРУЗДЕВ Владимир Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор, лауреат  
Государственной премии России в области  
науки и техники, профессор кафедры физики  
УО «Полоцкий государственный университет»

Официальные оппоненты: **КУНДАС Семен Петрович**,  
доктор технических наук, профессор, ректор УО  
«Международный государственный  
экологический университет им. А.Д. Сахарова»

**ЗАВАДСКИЙ Сергей Михайлович**,  
кандидат технических наук, директор центра 10.1  
«Электронных технологий и технической  
диагностики технологических сред и  
твердотельных структур» научно-  
исследовательской части УО «Белорусский  
государственный университет информатики и  
радиоэлектроники»

Оппонирующая  
организация:

Физико-технический институт Национальной  
академии наук Беларуси

Защита состоится 26 июня 2012 г. в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.04.01 при государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6. Телефон ученого секретаря (+375 17) 284 21 68, факс (+375 17) 284 21 75, e-mail: lipn@newman.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «\_2\_» \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
доктор технических наук, доцент

С.Ф. Липницкий

## ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевые технологии получили широкое распространение в различных областях промышленности. Основу электронно-лучевых технологических установок составляют электронные пушки, которые включают электронно-оптические системы (ЭОС), обеспечивающие эмиссию электронов, формирование и ускорение электронного пучка. По типу эмиттера электронов ЭОС можно разделить на три класса: источники электронов с накаливаемым катодом (пушки с термокатодом), источники электронов с холодным катодом (пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда), плазменные источники электронов (ПИЭЛ) или пушки с плазменным эмиттером (ПЭ).

Для сокращения объема экспериментальных работ при проектировании современных технологических электронно-лучевых установок и оптимизации конструкций ЭОС в настоящее время широко применяется компьютерное моделирование. Отличительные особенности каждого класса ЭОС не позволяют разработать универсальный метод решения задач электронной оптики. Поэтому для пушек с термокатодом, с плазменным катодом и холодным катодом разрабатываются собственные методы численного моделирования, которые базируются на особенностях физико-математической модели каждого типа ЭОС.

К настоящему времени для расчета термокатодных пушек создано большое количество пакетов прикладных программ (ППП), основу которых составляют методы численного анализа. Для пушек с холодным катодом специальное программное обеспечение не разработано, однако, в связи с тем, что в таких источниках эмиттером электронов служит твердотельный катод, то для расчета этого класса ЭОС, как правило, используют пакеты программ, предназначенные для моделирования термокатодных пушек и доработанные методами описания движения потока ионов, например пакеты ЭРА и BEAMCAD.

Для моделирования пушек с плазменным эмиттером использовать ППП, предназначенные для расчета термокатодных источников, не представляется возможным, так как методы моделирования ЭОС с термокатодом не учитывают существенные отличительные особенности ПИЭЛ: подвижность плазменной границы, динамику формы и площади эмитирующей поверхности, режимы эмиссии с открытой и закрытой для ускоряющего поля эмитирующей поверхности, высокие значения начальной тепловой энергии электронов, влияние обратного ионного потока на параметры эмитирующей плазмы, повышенную интенсивность ионизационных процессов в промежутке ускорения, процессы вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиттерного электрода и эмитирующей плазмы, стационарный и нестационарный режимы формирования пучка.

Указанные отличия приводят к тому, что ЭОС с ПЭ являются более многофакторными, чем ЭОС с твердым катодом. Поэтому создание методов численного моделирования и пакета прикладных программ для моделирования физических процессов в ЭОС с плазменным эмиттером является актуальной задачей теории электронной оптики.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Исследования проводились в рамках:

– Государственной программы прикладных научных исследований «Материалы в технике» (задание 1.36.02) совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси «Разработка процессов и технологических основ получения изделий из отходов тугоплавких металлов электронно-лучевым переплавом» (№ ГР 20072125, 2007-2010гг.);

– Инновационного проекта Министерства образования «Разработать опытный образец отечественного электронно-лучевого энергокомплекса на базе пушки с плазменным эмиттером» (№ГР 20102193, 2010-2012гг.);

– гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор №Т99-342 «Исследование закономерностей электронно-лучевого воздействия на боросодержащие материалы и принципов оптимизации электронно-лучевого оборудования для технологии упрочнения и восстановления» (№ГР 20003714, 2000-2001гг.);

– гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований для молодых ученых, договор №Т02М-090 «Первичное формирование электронных пучков с заданными характеристиками в плазменных источниках заряженных частиц» (№ГР 20022098, 2002-2003гг.);

– гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по совместному Белорусско-российскому проекту, договор №Ф10Р-219 «Вычислительные технологии решения задач анализа и синтеза электронно-оптических систем» (№ГР 20101999, 2010-2012гг.);

– госбюджетных научно-исследовательских работ, выполняемых в Полоцком государственном университете в 1994–2000 годах по темам «Исследование нестационарных процессов в плазменных источниках заряженных частиц при повышенных давлениях» (№ГР 1994955, 1994г.), «Разработка теоретических основ плазменного эмиттера с повышенным рабочим давлением» (№ГР 1995310, 1995г.), «Разработка и исследование экспериментального образца плазменного источника электронов с повышенным рабочим давлением» (№ГР 1996669, 1996г.), «Исследование принципов генерации высокоэнергетических электронных пучков в форвакуумных газоразрядных структурах для технологических целей» (№ГР 19974049, 1997г.), «Разработка теоретических основ плазменных источников электронов» (№ГР 19974060, 1997г.), «Моделирование на ЭВМ электронно-оптической системы с подвижным плазменным эмиттером» (№ГР 19981700, 1998г.), «Исследование условий формирования в плазменных источниках электронов пучков большого сечения с заданным распределением тока» (№ГР 2000906, 2000г.).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на

2011–2015 годы «Физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук» и «Физика фундаментальных взаимодействий, высоких энергий и экстремальных состояний вещества, плазма и ее применение, плазменно-пучковые технологии» (постановление Совета Министров Республики Беларусь 19.04.2010 № 585).

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является разработка методов моделирования ЭОС с плазменным эмиттером и создание пакета прикладных программ для расчета электронной оптики плазменных источников электронов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать физико-математическую модель ЭОС ПИЭЛ с учетом отличительных особенностей данного класса электронно-оптических систем.
2. Разработать алгоритм определения установившегося положения плазменной границы и формы эмитирующей поверхности, который учитывает изменение характеристик плазмы при ее проникновении в канал, динамику эмитирующей поверхности под действием ионизационных и сопутствующих им процессов, два возможных режима эмиссии (режим ограничения тока объемным зарядом и режим эмиссии через потенциальный барьер) при различных условиях формирования эмитирующей поверхности.
3. Разработать метод моделирования процессов ионизации, на базе которого создать алгоритм численного анализа динамики газонаполненных ЭОС, который позволит оценить влияние ионов и парных электронов на характеристики пучка.
4. Разработать алгоритмы моделирования процессов вторичной ионно-электронной эмиссии, которые позволят исследовать влияние обратного ионного потока на эмиссионные свойства плазмы и влияние электронов вторичной эмиссии на характеристики пучка и ионизационные процессы.
5. Разработать модель самосогласованного движения потоков всех видов заряженных частиц в ЭОС ПИЭЛ (электронов пучка, ионов, парных электронов и электронов вторичной эмиссии), на основе которой обобщить на случай области с подвижными границами алгоритм расчета электрического поля и создать экономичный по объему вычислений алгоритм расчета интенсивных пучков.
6. На базе методов численного анализа ЭОС ПИЭЛ создать программный комплекс для моделирования стационарных и нестационарных задач электронной оптики и проведения сравнительного анализа формирования электронных пучков в различных физических условиях: режиме внешнего поля, вакуумном режиме, режиме ионизационных процессов и процессов вторичной ионно-электронной эмиссии.
7. Методом компьютерного моделирования исследовать влияние параметров ЭОС и эмитирующей плазмы на характеристики электронного пучка с целью оптимизации конструкции плазменных источников электронов.

**Объектом исследования** является электронно-оптическая система с плазменным эмиттером. Методы исследования: компьютерное моделирование, методы численного анализа.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы моделирования физических процессов в ЭОС с плазменным эмиттером (ионизации, вторичной ионно-электронной эмиссии, движения плазменной границы).

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Физико-математическая модель ЭОС ПИЭЛ, учитывающая в отличие от существующих характерные особенности источников электронов с плазменным эмиттером: подвижность границы эмиттера, динамику формы и положения эмитирующей поверхности, особенности возможных режимов эмиссии, ионизационные процессы, влияние обратного ионного потока на эмиссионные свойства плазмы, процессы вторичной ионно-электронной эмиссии, переменный первеанс, динамику электронно-оптических свойств ускоряющего промежутка.

2. Совокупность алгоритмов и методов моделирования положения и формы эмитирующей плазменной поверхности, движения электронного потока, ионизационных процессов в объеме электронного пучка, вторичных ионно-электронных эмиссионных процессов, возбуждаемых обратным ионным потоком. В отличие от известных алгоритмов разработанные методы обеспечивают компьютерное моделирование основных физических процессов в ЭОС с плазменным эмиттером и позволяют решать стационарные и нестационарные нелинейные самосогласованные задачи электронной оптики по расчету электрического поля, движения потоков заряженных частиц в вакуумных и газонаполненных электродных структурах диодного и триодного типов.

3. ППП ELIS, который в отличие от существующих пакетов программ, представляет собой инструментарий, обеспечивающий на этапах проектирования и оптимизации конструкций технологических электронных пушек с ПЭ проведение численных экспериментов с целью анализа влияния различных физических условий на электронно-оптические свойства системы первичного формирования пучка.

4. Методика численного анализа ЭОС с плазменным эмиттером, которая в отличие от известных разработок позволяет установить:

- критические давления, выше которых в газонаполненных ЭОС с плазменным эмиттером возникают вторичные плазменные образования (прикатодная плазма при формировании электронных сфокусированных пучков с высокой плотностью мощности или прианодная плазма при формировании пучков большого сечения);
- условия (параметры ЭОС, значение давления), при которых эмиссия электронов из плазмы осуществляется в стационарном режиме или в нестационарном режиме, возникающем вследствие воздействия на эмитирующую границу плазмы вторичных плазменных образований.

**Научная значимость** полученных результатов заключается в разработке новых моделей, алгоритмов и методов численного анализа ЭОС, которые применимы для решения стационарных и нестационарных нелинейных самосогласованных задач электронной оптики с подвижной плазменной границей и для проведения сравнительного анализа влияния различных физических условий на свойства ЭОС и характеристики пучка.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в создании пакета прикладных программ и возможности использования программного комплекса для сокращения сроков и стоимости этапов проектирования и оптимизации конструкций сравнительно нового и перспективного типа технологических электронных пушек с плазменным эмиттером. Полученные зависимости характеристик пучка от параметров ЭОС и эмитирующей плазмы могут найти применение для определения электронно-оптических свойств системы первичного формирования пучка, рабочих диапазонов параметров ЭОС и характеристик управления. Разработанный программный комплекс можно рассматривать как часть перспективного для разработки программного обеспечения для моделирования пушки с плазменным эмиттером в целом, которое должно включать алгоритмы моделирования процессов в генераторах эмитирующей плазмы и возмущения эмитирующей плазмы отбором электронов.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя состоит в разработке алгоритмов моделирования ЭОС с плазменным эмиттером и создании на базе разработанных методов численного анализа пакета прикладных программ для расчета электронной оптики плазменных источников электронов, а также в проведении численных экспериментов с целью исследования влияния различных физических условий на электронно-оптические свойства ПИЭЛ.

Вклад соавторов совместных публикаций по теме диссертации состоял в научном руководстве, обсуждении полученных результатов, помощи в оценке возможностей их практического использования. Расширение области практического применения самостоятельно разработанных алгоритмов и программного комплекса, предназначенных для моделирования ЭОС с плазменным эмиттером, на ЭОС с твердотельным катодом осуществлялось совместно с соавторами работ В.М. Свешниковым и А.Ф. Стекольниковым. Верификация пакета прикладных программ проведена совместно с В.Г. Залесским, предоставившим результаты экспериментальных измерений.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на IV, VIII, IX, X Международных семинарах «Нелинейные явления в сложных системах» (Минск, 1995г., 1999г., 2000г., 2001г.), Международной 53-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА (Минск, 1999г.),

Международной научно-технической конференции «Наука и технологии на рубеже XXI века» (Минск, 2000г.), IV, V VI Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2001г., 2003г., 2005г.), Международной научно-технической конференции «Надежность машин и технических систем» (Минск, 2001г.), VI Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками» (Томск, 2002г.), Международной конференции по математическому моделированию (Херсон, 2002г., 2003г.), XX, XXI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Tours, France, 2002г., Yalta, 2004г.), II, III Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2002г., 2004г.), International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta, 2002г.), Международной научно-технической конференции «Проблемы электроники» (Киев, 2004г.), Международной конференции по вычислительной математике (Новосибирск, 2004г., 2011г.), V, VI, VII, VIII, XI, X Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (Москва 2001г., 2003г., 2005г., 2007г., 2009г., 2011г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основное содержание диссертации отражено в 42 научных работах, из них 11 опубликованы в рецензируемых научных изданиях (8,7 авторских листа), 3 – в научных журналах (1,75 авторских листа), 17 – в сборниках материалов конференций (4,87 авторских листа), 11 – в сборниках тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка, трех приложений. Полный объем диссертации составляет 199 страниц. Работа содержит 60 иллюстраций на 56 страницах, 10 таблиц на 10 страницах, 3 приложения на 7 страницах. Библиографический список на 17 страницах включает в себя 203 наименования из них 42 – авторские публикации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность разработки методов и пакета прикладных программ для моделирования ЭОС с плазменным эмиттером; выделяются основные этапы работы.

**В первой главе** рассматриваются типы плазменных эмиссионных систем: с точечным эмиттером и с эмиттером большого сечения. Выделяются характерные особенности, которые необходимо учитывать при разработке физико-математических моделей ЭОС с ПЭ: подвижность границы эмиттера, динамика формы эмитирующей поверхности, режимы эмиссии с открытой для ускоряющего поля и с закрытой пристеночным слоем поверхности плазмы, объемные ионизационные процессы, процессы вторичной ионно-электронной эмиссии, влияние обратного ионного потока на эмиссионные свойства плазмы, переменный первеанс, динамика электронно-

оптических свойств системы первичного формирования пучка во времени, стационарный и нестационарный режимы формирования пучка.

Представлен анализ существующих методов и пакетов прикладных программ для моделирования ЭОС с твердотельными катодами в контексте возможности их использования для моделирования ПИЭЛ. Проводится сравнительная характеристика пакетов прикладных программ для моделирования ЭОС и обосновывается ограниченность возможности их использования для численного анализа ПИЭЛ. Формулируются задачи исследования, которые необходимо решить для разработки технологии численного моделирования ЭОС с подвижным плазменным эмиттером.

**Во второй главе** рассматриваются разработанные физико-математическая модель и методы численного моделирования ЭОС с плазменным эмиттером, которые учитывают характерные особенности источников электронов с плазменным эмиттером.

Для расчета электрического поля, самосогласованного с объемными зарядами всех типов частиц в ЭОС, используется уравнение Пуассона в области с подвижными границами.

Движение электронов пучка описывается методом деформируемых трубок тока. Основу модели электронного потока составляет система уравнений:

$$\frac{m_e \vartheta^2(z, r)}{2} = \frac{m_e \vartheta_0^2}{2} + |e|(\varphi(z, r) - \varphi_{nl}(z)), \quad j_e(z, r) = \frac{I_\vartheta}{S_n(z)},$$

$$m_e \frac{d\bar{\vartheta}(z, r)}{dt} = |e| \cdot \text{grad}\varphi(z, r), \quad \vartheta_0 = \sqrt{\frac{8kT_e}{m_e \pi}} \quad \rho_e(z, r) = \frac{I_\vartheta}{\vartheta(z, r) \cdot S_n(z)},$$

Эмиссионный ток в зависимости от типа ПИЭЛ и режима эмиссии определяется согласно следующим выражениям:

<u>ПИЭЛ с точечным эмиттером</u>	<u>ПИЭЛ с эмиттером большого сечения</u>
1. Режим эмиссии с открытой эмитирующей поверхностью плазмы: $I_\vartheta = j_{e0} \cdot S_0.$	1. Режим полной проницаемости сетки: $I_\vartheta = j_{e0} \cdot S_{cem}.$
2. Режим эмиссии с закрытой полем пристеночного слоя поверхности плазмы: $I_\vartheta = j_{e0} \cdot S_0 \cdot \exp\left(\frac{ e (\varphi(z, r) - \varphi_{nl}(z))}{kT_e}\right), z < z _{\varphi_{min}}$	2. Режим густой сетки: $I_\vartheta = j_{e0} \cdot S_{cem} \cdot \xi \cdot \exp\left(\frac{ e (\varphi_{cem} - \varphi_{nl})}{kT_e}\right)$
$I_\vartheta = j_{e0} \cdot S_0 \cdot \exp\left(\frac{ e (\varphi_{min} - \varphi_{nl}(z))}{kT_e}\right), z \geq z _{\varphi_{min}}$	3. Режим редкой сетки: $I_\vartheta = j_{e0} \cdot S_{cem} \cdot \xi.$

$$j_{e0} = \frac{1}{4} |e| n_{nl}(z) \vartheta_0$$

Здесь  $m_e$  – масса электрона,  $\vartheta(z, r)$  – скорость электронов в точке с координатами  $(z, r)$ ,  $\vartheta_0$  – начальная скорость эмитированных электронов,  $e$  – заряд электрона,  $\varphi(z, r)$  – потенциал поля в точке с координатами  $(z, r)$ ,  $\varphi_{nl}(z)$  – потенциал плазмы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  – электронная температура плазмы,  $j_e(z, r)$  – плотность тока,  $I_\vartheta$  –

эмиссионный ток,  $S_n(z)$  – площадь поперечного сечения трубки тока плоскостью  $z = const$ ,  $\rho_e(z, r)$  – объемный заряд электронов пучка,  $j_{e0}$  – плотность теплового тока электронов из невозмущенной плазмы,  $S_0$  – площадь эмитирующей поверхности плазмы для каждой трубки тока,  $n_{nl}(z)$  – концентрация электронов в плазме,  $\varphi_{\min}$  – минимум потенциала,  $S_{cem}$  – полная площадь эмитирующей поверхности, закрытая сеточным электродом,  $\xi$  – коэффициент прозрачности сетки,  $\varphi_{cem}$  – потенциал сеточного электрода.

Движение потока ионов и парных электронов, образовавшихся в пучке, описывается гидродинамическим методом. Основу модели ионизационных процессов составляет следующая система уравнений:

$\frac{\partial \rho_{iu}(z, r)}{\partial t} = \rho_{gen}(z, r) - \text{div}(\rho_{iu} \cdot \vec{\mathfrak{G}}_i),$ $\frac{m_i \mathfrak{G}_i^2(z, r)}{2} =  e \Delta \varphi ,$ $m_i \frac{d \vec{\mathfrak{G}}_i(z, r)}{dt} = - e  \cdot \text{grad} \varphi(z, r),$	$\frac{\partial \rho_{eu}(z, r)}{\partial t} = \rho_{gen}(z, r) - \text{div}(\rho_{eu} \cdot \vec{\mathfrak{G}}_e),$ $\frac{m_e \mathfrak{G}_e^2(z, r)}{2} =  e \Delta \varphi ,$ $m_e \frac{d \vec{\mathfrak{G}}_e(z, r)}{dt} =  e  \cdot \text{grad} \varphi(z, r),$
$\rho_{gen}(z, r) = p \cdot j_e(z, r) \cdot Q_{i0}(z, r) = p \cdot j_e(z, r) \cdot a (\varphi(z, r) - \tilde{\varphi}) \cdot \exp\left(\frac{\tilde{\varphi} - \varphi(z, r)}{b}\right).$	

Здесь  $\rho_{iu}(z, r)$  и  $\rho_{eu}(z, r)$  – объемные заряды ионов и парных электронов,  $\rho_{gen}(z, r)$  – объемный заряд частиц, возникающих в единице объема пучка за единицу времени,  $\vec{\mathfrak{G}}_i(z, r)$  и  $\vec{\mathfrak{G}}_e(z, r)$  – скорости движения ионов и парных электронов,  $m_i$  и  $m_e$  – массы иона и электрона соответственно,  $\Delta \varphi$  – разность потенциалов между начальной и конечной точками движения заряженных частиц,  $p$  – давление остаточного газа,  $j_e(z, r)$  – плотность тока электронов пучка,  $Q_{i0}(z, r)$  – сечение ионизации,  $a$ ,  $b$ ,  $\tilde{\varphi}$  – константы для данного вида газа.

Граница плазмы в режиме ограничения тока объемным зарядом устанавливается в точках, где выполняется условие равенства нулю напряженности поля ( $\text{grad} \varphi = 0$ ) в совокупности с условием устойчивости плазменного образования в канале. Вблизи плазменного катода распределение потенциала описывается законом степени трех вторых для плоского диода. Положение и форма эмитирующей поверхности в режиме эмиссии через потенциальный барьер задаются полем пристеночного слоя и условием устойчивости плазмы в канале. Радиус плазмы  $r_{nl}(z)$  в эмиссионном канале рассчитывается с учетом толщины пристеночного слоя. Концентрация плазмы при ее проникновении в канал на расстояние  $z$  изменяется согласно экспоненциальному закону

$$n_{nl}(z) = n_{nl}(0) \exp\left(-\frac{z}{r_{nl}(z)}\right),$$

где  $z$  – осевая координата,  $n_{nl}(z)$  и  $n_{nl}(0)$  –

концентрация плазмы в точке  $z$  и на входе в канал соответственно. Потенциал плазмы  $\varphi_{nl}(z)$  в эмиссионном канале анодного эмиттерного электрода не изменяется, а в канале

эмиттерного электрода с катодным потенциалом уменьшается по закону

$$\varphi_{nl}(z) = \varphi_{nl}(0) - \frac{kT_e}{|e|} \frac{z}{r_{nl}(z)}.$$

Положение и форма плазменной границы, искаженной ионизационными процессами, задается двумя моделями. В первой модели движение эмиттирующей поверхности описывается законом «степени трех вторых» для плоского диода. Во второй модели расстояние, на которое отодвигается поверхность плазмы, определяется как произведение скорости движения эмиттера на временной шаг. Скорость движения плазменной поверхности  $\mathfrak{G}_{nl}$  вычисляется из условия равенства давления электростатического поля и гидродинамического давления плазмы  $\frac{\varepsilon_0 (\text{grad}\varphi)_{nl}^2}{2} = \frac{|e| n_{nl} \mathfrak{G}_{nl}^2}{2}$ . Если у границы плазмы  $(\text{grad}\varphi)_{nl} > 0$ , то поверхность плазмы смещается от ускоряющего электрода, если  $(\text{grad}\varphi)_{nl} < 0$ , то плазменная поверхность сдвигается по направлению к ускоряющему электроду, соответственно увеличивая или уменьшая ускоряющий промежуток.

Влияние обратного ионного потока в плазму  $j_{inl}^{обп}$  на ее эмиссионные свойства задается выражением  $j_{e0}^* = j_{e0} + \gamma_p j_{inl}^{обп}$ , где  $j_{e0}$  – плотность электронного тока с границы невозмущенной ионами плазмы,  $\gamma_p$  – коэффициент, определяющий дополнительный выход электронов из плазмы в среднем на один инжектированный в нее ион из промежутка ускорения.

Вторичная эмиссия с поверхности эмиттерного электрода  $j_{e0}^{этор}$  определяется через коэффициент ионно-электронной эмиссии  $\gamma$  и плотность потока ионов на стенке электрода  $j_{i0}^{обп}$ :  $j_{e0}^{этор} = \gamma j_{i0}^{обп}$ .

Движение  $\gamma$ -электронов, как и электронов пучка, описывается методом деформируемых трубок тока. Объемный заряд и ионизация остаточного газа  $\gamma$ -электронами рассчитываются аналогично электронам пучка.

Решение системы уравнений физико-математической модели находится численными методами. Уравнение Пуассона решается методом конечных разностей. Для двумерного оператора Лапласа применяется разностная аппроксимация на пятиточечном шаблоне. Решение системы алгебраических уравнений строится методом Зейделя. Итерационный процесс последовательных приближений распределения потенциала прерывается при достижении заданной точности.

Система уравнений, описывающих электронный пучок, решается методом деформируемых трубок тока. Исключение времени из уравнения Ньютона приводит к уравнению траектории:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \left( \frac{\partial \varphi(z, r)}{\partial r} - \frac{\partial \varphi(z, r)}{\partial z} \cdot \frac{dr}{dz} \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{dr}{dz} \right)^2 \right) : \left( \frac{m_e \mathfrak{G}_0^2}{|e|} + 2(\varphi(z, r) - \varphi_{nl}(z)) \right),$$

которое численно интегрируется с двукратным последовательным применением явной схемы Эйлера, что позволяет получить дополнительную информацию о таких свойствах пучка как фазовый портрет и эмиттанс.

Для нахождения плотности тока и объемного заряда электронов пучка эмитирующая поверхность плазмы разбивается на слои, аппроксимируемые боковой поверхностью усеченного конуса. Для каждого слоя вычисляется среднее значение концентрации плазмы, по которому рассчитывается плотность эмиссионного тока для каждой токовой трубки. Учитываются различные направления начальной скорости электронов. Для каждого угла вылета рассчитываются площади  $S_n(z)$  между граничными траекториями трубки тока в каждом сечении  $z = const$ . Объемный заряд и плотность тока для всех точек сетки, принадлежащих области  $S_n(z)$  определяются с учетом изменения площади трубки тока.

Системы уравнений для ионов и парных электронов решаются методом конечных разностей. Временной шаг определяется условием устойчивости разностной схемы и выбирается меньшим времени движения заряженных частиц в соседние узлы сетки. На каждом шаге по времени итерационным методом находится решение самосогласованной задачи, что позволяет для нестационарных задач строить решение методом квазистационарных приближений.

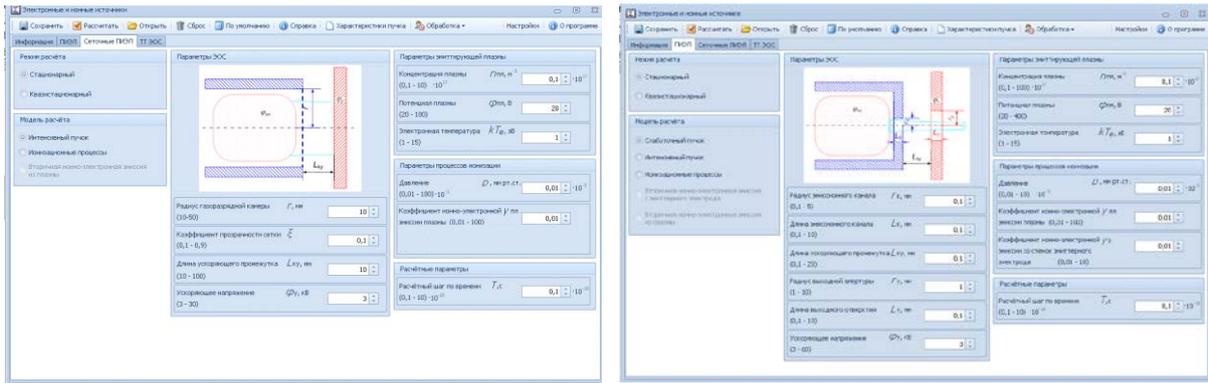
Уравнения траекторий электронов вторичной эмиссии решаются аналогично уравнениям движения электронов пучка методом деформируемых трубок тока.

В заключении второй главы приводятся алгоритм моделирования ЭОС с ПЭ, который включает в себя вакуумный блок, ионизационный блок, дополнительные блоки; результаты тестовых расчетов по определению критерия выхода из итерационного процесса последовательных приближений и размера прикатодной области.

**В третьей главе** приводится характеристика разработанного ППП ELIS, позволяющего решать задачу оптимизации конструкций ПИЭЛ и проводить сравнительный анализ формирования электронных пучков в различных условиях: режиме поля системы электродов, вакуумном режиме, режиме ионизационных процессов и процессов вторичной ионно-электронной эмиссии.

Разработанный пакет программ позволяет решать задачи синтеза ЭОС с плазменным эмиттером путем многократного применения алгоритмов анализа на каждом шаге последовательного приближения и моделировать пушки с твердотельными (ТТ) катодами.

Диалоговый интерфейс пакета прикладных программ (рисунок 1) позволяет задать тип моделируемой ЭОС (ПИЭЛ, Сеточные ПИЭЛ, ТТ ЭОС), режим расчета (Стационарный или Квазистационарный), модель расчета (Слаботочный пучок, Интенсивный пучок, Ионизационные процессы, Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода, Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы), входные данные модели для выбранного типа моделируемой ЭОС.



**Рисунок 1 – Оконный пользовательский интерфейс ППП ELIS**

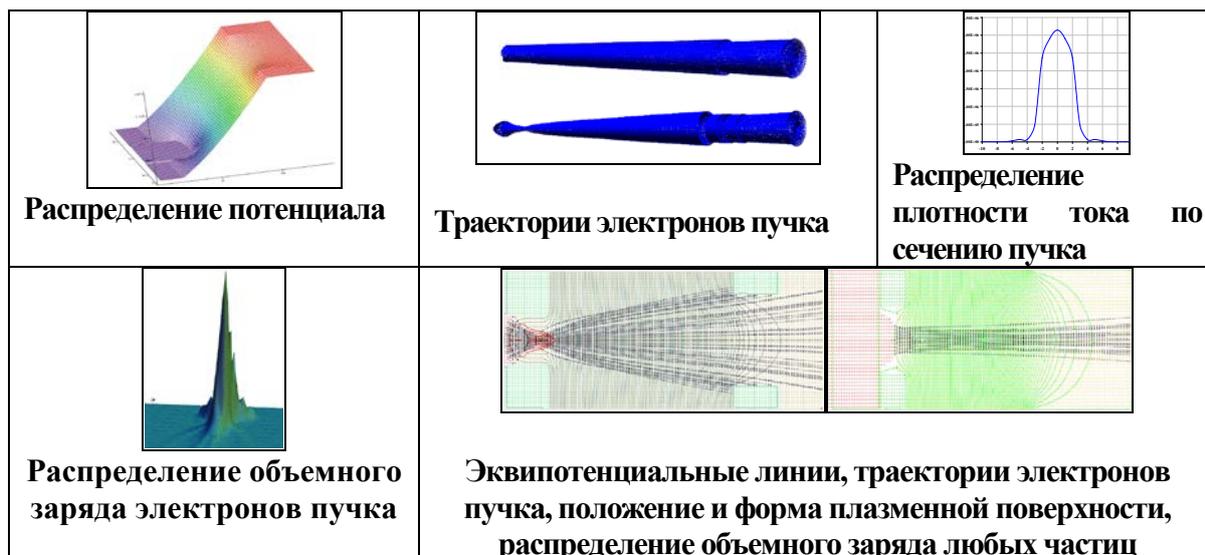
Для вкладки ПИЭЛ в режиме расчета Стационарный активны три модели: Слаботочный пучок, Интенсивный пучок, Ионизационные процессы. В режиме расчета Квазистационарный активны три следующие модели: Ионизационные процессы, Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода, Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы. Для вкладки Сеточные ПИЭЛ в режиме расчета Стационарный активны две модели: Интенсивный пучок, Ионизационные процессы. В режиме расчета Квазистационарный активны две следующие модели: Ионизационные процессы, Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы. Для вкладки ТТ ЭОС в режиме расчета Стационарный активны три модели: Слаботочный пучок, Интенсивный пучок, Ионизационные процессы. В режиме расчета Квазистационарный активны две модели: Ионизационные процессы, Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода.

Входные параметры модели: геометрия эмиссионного канала и ускоряющего промежутка, концентрация и потенциал плазмы на входе в эмиссионный канал, давление газа в ЭОС, потенциалы ускоряющего и эмиттерного электродов, – задаются в полях Параметры ЭОС, Параметры эмитирующей плазмы, Параметры процессов ионизации.

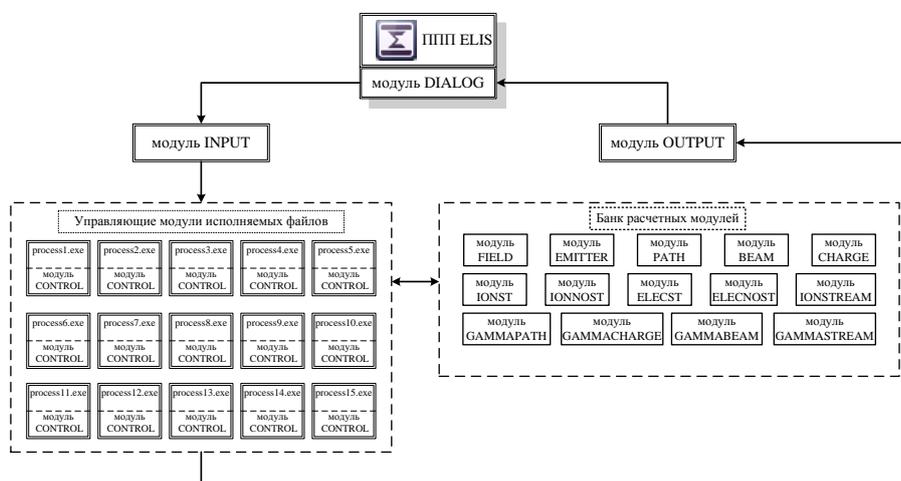
Выходными данными пакета программ являются (рисунок 2): распределение потенциала; траектории электронов пучка и электронов вторичной ионно-электронной эмиссии; первеанс ЭОС; характеристики пучка (ток, диаметр, расходимость, фазовый портрет, распределение плотности тока по радиусу в любом сечении пучка); распределение объемного заряда электронов пучка, ионов и парных электронов, электронов вторичной эмиссии; форма и положение эмитирующей поверхности; обратный ионный поток на стенки электродов или в плазму.

Визуализация данных численного моделирования пакетом прикладных программ непосредственно не поддерживается, а используется программное обеспечение, в котором предусмотрена визуализация массивов данных.

Архитектура ППП ELIS включает в себя диалоговый модуль, модуль входных данных, модуль выходных данных, управляющие модули исполняемых файлов, расчетные модули. Структурная диаграмма компонентов пакета представлена на рисунке 3.



**Рисунок 2 – Примеры выходных данных ППП ELIS**



**Рисунок 3 – Структурная диаграмма компонентов ППП ELIS**

Диалоговый модуль DIALOG задает оконный пользовательский интерфейс, модуль входных данных INPUT считывает входные данные, задаваемые пользователем в диалоговом окне, и передает их в расчетную программу, а также осуществляет выбор расчетной программы в зависимости от активного диалогового окна и выбранных пользователем конфигураций в полях режим расчета и модель расчета. Модуль выходных данных OUTPUT позволяет просматривать полученные результаты. Управляющие модули CONTROL вызывают расчетные модули (FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONST, IONNOST, ELECST, ELECNOST, IONSTREAM, GAMMASTREAM, GAMMAPATH, GAMMACHARGE, GAMMABEAM), необходимые для решения поставленной пользователем численной задачи. В зависимости от активного диалогового окна и выбранных пользователем конфигураций в полях режим расчета и модель расчета в программу численного анализа подключаются различные расчетные модули.

Верификация программного комплекса ELIS и разработанных алгоритмов проводилась путем сравнения расчетных данных и результатов экспериментальных

исследований технологических источников электронов с плазменным эмиттером двух типов: ПИЭЛ с пучком большого сечения (ПБС) на основе разряда в скрещенных  $\vec{E} \times \vec{H}$  полях и ПИЭЛ на основе разряда с полым катодом. Сравнение численных и экспериментальных данных показало, что качественный вид вольтамперных, эмиссионных и газовых характеристик совпадает, что служит подтверждением адекватности разработанных моделей, алгоритмов и программных продуктов физическим процессам в ускоряющем промежутке ЭОС источника, которые оказывают влияние на первичное формирование пучка. Отличие расчетных и экспериментальных данных не превышает 10%.

Анализ результатов верификации разработанных программных средств на экспериментальных данных позволяет сделать вывод о целесообразности практического применения ППП ELIS на этапах проектирования и оптимизации конструкций технологических электронных пушек с плазменным эмиттером с целью сокращения материальных и энергетических затрат при конструировании электронно-лучевых установок.

Результаты диссертационной работы были использованы при проведении работ по модернизации установки электронно-лучевой сварки на РУП «Минский тракторный завод» с заменой термокатодной пушки на электронную пушку с плазменным эмиттером. Численное моделирование электронно-лучевой пушки с плазменным эмиттером, проведенное с целью определения условий, необходимых для формирования пучков с требуемыми характеристиками, (плотностью тока  $\sim 10^4 \text{ А/м}^2$  и плотностью мощности  $\sim 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ), позволило подобрать геометрию эмиссионного канала для заданных значений рабочего напряжения и токов разряда.

**В четвертой главе** приводятся результаты моделирования процессов формирования электронных пучков с заданными характеристиками, полученные с использованием ППП ELIS. Результаты численных экспериментов позволили дать объяснение экспериментально наблюдаемым особенностям ПИЭЛ, а также установить неизвестные ранее свойства и особенности ЭОС с ПЭ. Показано, что влияние параметров ЭОС, эмитирующей плазмы, внешних параметров на формирование электронного пучка в ЭОС с ПЭ носит сложный характер. Получены зависимости характеристик пучка от параметров ЭОС и эмитирующей плазмы (приведенной напряженности ускоряющего поля, длины и радиуса канала, концентрации и потенциала плазмы), которые могут найти применение для определения электронно-оптических свойств системы первичного формирования пучка, рабочих диапазонов параметров ЭОС и характеристик управления.

Исследованы стационарный и нестационарный режимы формирования пучка при повышенном рабочем давлении в промежутке ускорения ЭОС. Установлены критические значения давления, при превышении которых формирование электронного пучка становится нестационарным. Для ПИЭЛ, формирующих остросфокусированные пучки, критические значения давлений лежат в диапазоне 0,4–0,8 Па, для ПИЭЛ с ПБС в диапазоне 0,3–1,3 Па.

Показано, что при давлениях выше критического в эмиссионном канале ПИЭЛ с

точечным эмиттером может возникать вторичная прикатодная плазма с потенциалом, превышающим потенциал эмиттирующей плазмы на несколько сотен вольт. Перемещение вторичной плазмы вглубь эмиссионного канала сопровождается движением эмиттирующей поверхности и двойного слоя по направлению к разрядной камере, что может приводить к снижению электрической прочности промежутка ускорения ЭОС вследствие роста эмиссионного тока и усиления ионизационных процессов. Обнаружена эволюция вторичной плазмы в периодическом режиме, которая характеризуется сменой процессов ее генерации и разрушения, что вызывает периодические изменения характеристик пучка.

Методом численного моделирования исследованы особенности эмиссии в ПИЭЛ с ПБС и влияние процессов ионизации на электронно-оптические свойства промежутка ускорения ПБС. Установлен механизм нестабильности эмиссии в режиме полной проницаемости сетки, который объясняет один из типов электрического пробоя ускоряющего промежутка и обусловлен хаотическим колебательным движением эмиттирующей поверхности. Показана возможность изменения режимов эмиссии вследствие влияния процессов ионизации и, как следствие, нарушения стабилизирующей роли сеточного электрода.

Показано, что при значениях давления выше критического в режимах эмиссии через сеточный электрод в области, прилегающей к ускоряющему электроду, может формироваться вторичная прианодная плазма (виртуальный плазменный анод), потенциал которой по значению близок к потенциалу ускоряющего электрода (киловольты).

На основе численных экспериментов установлено два механизма пробоя ускоряющего промежутка ЭОС с ПБС. Первый механизм обусловлен заполнением ускоряющего промежутка вторичной прианодной плазмой, что приводит к резкому росту эмиссионного тока и усиливает процессы ионизации, поэтому область, занятая вторичной плазмой расширяется. Второй механизм обусловлен деформацией потенциала в ячейках сетки вследствие движения ионов в область сеточного электрода. По этой причине протяженность пристеночного слоя уменьшается, что приводит к проникновению эмиттирующей плазмы через сеточный электрод в ускоряющий промежуток и нестабильной эмиссии с открытой плазменной поверхностью.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработана физико-математическая модель ЭОС ПИЭЛ, учитывающая в отличие от существующих моделей характерные особенности источников электронов с плазменным эмиттером: подвижность границы эмиттера, динамику формы и положения эмиттирующей поверхности, особенности возможных режимов эмиссии, ионизационные процессы, влияние обратного ионного потока на эмиссионные свойства плазмы, процессы вторичной ионно-электронной эмиссии, переменный первеанс, динамику электронно-оптических свойств ускоряющего промежутка [7, 12, 18].

2. Разработан алгоритм определения положения и формы плазменной границы, который в отличие от существующих алгоритмов учитывает изменение характеристик плазмы при ее проникновении в эмиссионный канал [4, 14], динамику эмиттирующей поверхности под действием ионизационных и сопутствующих им процессов [20, 26, 29], два возможных режима эмиссии. Алгоритм моделирования режимов эмиссии при

различных условиях формирования эмитирующей поверхности в отличие от существующих алгоритмов применим для расчета эмиссии через потенциальный барьер, созданный у поверхности плазмы полем пристеночного слоя объемного заряда [8, 31].

3. Разработан алгоритм моделирования процессов ионизации, который в отличие от существующих методик учитывает влияние ионов и парных электронов на характеристики пучка с течением времени [2, 12, 13, 18, 20, 24, 26].

4. Разработан алгоритм моделирования процессов вторичной ионно-электронной эмиссии, который в отличие от существующих разработок учитывает влияние обратного ионного потока на эмиссионные свойства плазмы, и влияние электронов вторичной эмиссии на характеристики пучка и ионизационные процессы [11, 12].

5. Предложена модель самосогласованного движения потоков всех видов заряженных частиц в ЭОС ПИЭЛ, которая позволила обобщить на случай области с подвижными границами алгоритм расчета электрического поля [7, 12, 18, 29].

6. Разработаны методы численного анализа ЭОС с плазменным катодом, на базе которых создан пакет прикладных программ ELIS, применимый, в отличие от известных программных средств, для моделирования стационарных и нестационарных нелинейных самосогласованных задач электронной оптики с подвижной плазменной границей [38]. Пакет прикладных программ ELIS, зарегистрированный в Национальном центре интеллектуальной собственности (свидетельство о регистрации №347 от 17.08.2011), позволяет также в отличие от существующих разработок проводить сравнительный анализ формирования электронного пучка в различных физических условиях [11, 42].

7. Методом компьютерного моделирования исследовано влияние параметров ЭОС [4, 5, 14, 27, 36] и эмитирующей плазмы [4, 14, 27] на характеристики электронного пучка, что позволило найти объяснение известным, экспериментально обнаруженным особенностям ПИЭЛ и установить неизвестные ранее свойства и особенности ЭОС с плазменным эмиттером.

Установлены условия перехода от стационарного к нестационарному режиму формирования пучка, сопровождающиеся немонотонным распределением потенциала в промежутке ускорения ЭОС [39]. Найденные критические значения давления, соответствующие переходу в нестационарный режим, составляют в зависимости от типа ЭОС и параметров плазмы: 0,4–0,8 Па в случае формирования остросфокусированных пучков, и 0,3–1,3 Па при формировании ПБС, что согласуется с экспериментальными данными, полученными различными авторами [28, 30, 39, 41].

Определены условия образования в ускоряющем промежутке ПИЭЛ вторичной плазмы, характеристики которой определяются типом ЭОС [1, 15, 39, 41]. Для ПИЭЛ с точечным эмиттером, формирующих остросфокусированные пучки, характерно образование низкопотенциальной (прикатодной) вторичной плазмы внутри эмиссионного канала, которая представляет собой плазменную линзу, фокусирующую электроны пучка [2, 13, 16, 18]. В ПИЭЛ, формирующих ПБС, образуется высокопотенциальная (прианодная) вторичная плазма, которую можно рассматривать как виртуальный плазменный анод [1, 41].

Исследовано влияние эволюции прикатодной вторичной плазмы на электронно-

оптические свойства ускоряющего промежутка ПИЭЛ и характеристики пучка [16, 39]. Показано, что в процессе эволюции низкопотенциальной вторичной плазмы могут наблюдаться два характерных сценария: перемещение вторичной плазмы по направлению к разрядной камере, сопровождающееся движением эмитирующей поверхности и двойного слоя вглубь эмиссионного канала и ростом эмиссионного тока; или периодическая смена процессов генерации и разрушения вторичной плазмы, сопровождающаяся периодическими изменениями характеристик пучка.

Установлены механизмы снижения электрической прочности промежутка ускорения ПИЭЛ, характерные для каждого типа ЭОС [17, 21, 30, 39, 41]. Для ПИЭЛ с точечным эмиттером снижение электрической прочности ЭОС обусловлено смещением эмитирующей поверхности вглубь разрядной камеры, сопровождающееся ростом эмиссионного тока, и, как следствие, усилением ионизационных процессов вследствие эволюции вторичной прикатодной плазмы в эмиссионном канале.

Для ПИЭЛ с ПБС установлены два механизма пробоя ускоряющего промежутка. Первый механизм обусловлен заполнением ускоряющего промежутка вторичной прианодной плазмой, когда протяженность пристеночного слоя больше размеров ячеек сетки. Второй механизм обусловлен заполнением ускоряющего промежутка эмитирующей плазмой, что приводит к нестабильной эмиссии с открытой плазменной поверхностью, когда протяженность пристеночного слоя в отсутствие ионизации сравнима с размерами ячеек сетки.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Созданный пакет прикладных программ перспективен при практическом использовании для проведения анализа влияния различных физических условий в ЭОС на формирование пучка в стационарном и нестационарном режимах [11, 38, 42], что обеспечивает сокращение сроков и стоимости этапов проектирования и оптимизации конструкций сравнительно нового и перспективного типа технологических электронных пушек с плазменным эмиттером.

Полученные зависимости характеристик пучка от параметров ЭОС и эмитирующей плазмы (приведенной напряженности ускоряющего поля, длины и радиуса канала, концентрации и потенциала плазмы), позволяют определить электронно-оптические свойства системы первичного формирования пучка в ПИЭЛ, рабочие диапазоны параметров ЭОС и характеристики управления, что сокращает объем экспериментальных исследований.

Разработанные методики и программные средства были использованы при разработке экспериментальной конструкции источника электронов с плазменным эмиттером, который был введен в эксплуатацию на РУП МТЗ, и в дальнейшем могут найти практическое применение при проектировании ЭОС с плазменным эмиттером и с твердотельным катодом [3, 10, 23, 35, 40] для электронно-лучевых установок на других предприятиях в различных областях промышленности.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Груздев, В.А. О деформации распределения потенциала в ускоряющем промежутке плазменных источников электронов при повышенном давлении / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // ЖТФ. – 1995. – Т.65, № 10. – С.38 – 45.
2. Петрович, О.Н. Компьютерное моделирование влияния ионизации остаточного газа на формирование интенсивных электронных пучков в плазменных источниках заряженных частиц / О.Н. Петрович // Прикладная физика. – 2002. – № 3. – С.87 – 94.
3. Stekolnikov, A.F. Simulation of formation of an intensive electron beam in bipolar electron-optical system with the plasma anode / A.F. Stekolnikov, V.A. Gruzdev, O.N. Petrovich // Problems of Atomic Science and Technology. – Series: Plasma Physics (8). – 2002. – № 5. – P. 113 – 114.
4. Петрович, О.Н. Моделирование влияния параметров электродной структуры и эмитирующей плазмы на характеристики формируемого остросфокусированного электронного пучка / О.Н. Петрович, А.Ф. Стекольников // Прикладная физика. – 2004. – № 1. – С.65 – 72.
5. Петрович, О.Н. Моделирование влияния геометрии электродной структуры электронно-оптической системы на характеристики электронного пучка в плазменных источниках электронов / О.Н. Петрович // Электроника и связь. – 2004. – Т.9, № 22. – С. 110 – 112.
6. Груздев, В.А. Распределение потенциала в плоском диоде в режиме насыщения / В.А. Груздев, О.Н. Петрович // Вестник ПГУ. – Сер. С, Фундаментальные науки. – 2004. – № 4. – С.21 – 25.
7. Груздев, В.А. Особенности расчета электронно-оптических систем плазменных источников электронов / В.А. Груздев, О.Н. Петрович // Вестник ПГУ. – Сер. С, Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С.2 – 18.
8. Залесский, В.Г. Особенности формирования эмитирующей поверхности в плазменных источниках электронов / В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Вестник ПГУ. – Сер. С, Фундаментальные науки. – 2009. – № 9. – С. 69 – 76.
9. Груздев, В.А. Численное моделирование фазовой характеристики электронного пучка / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Вестник ПГУ. – Сер. С, Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 102 – 110.
10. Свешников, В.М. Моделирование ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области / В.М. Свешников, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С.40 – 44.
11. Петрович, О.Н. Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС ПИЭЛ / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С.79 – 85.

### Статьи в научно-технических журналах

12. Петрович, О.Н. Моделирование влияния процессов ионизации и вторичной ионно-электронной эмиссии на формирование интенсивных электронных пучков в плазменных источниках заряженных частиц / О.Н.

Петрович // Вестник ХГТУ: материалы V междунар. конференции по математическому моделированию, 2002; под ред. А.Н. Хомченко. – Херсон, 2002. – вып. 2 (15) – С. 369 – 372.

13. Petrovich, O.N. Computer simulation of influence of residual gas on formation of intensive electronic beams in plasma sources of the charged particles / O.N. Petrovich // Proceedings of SPIE. – Vol. 5025: Fifth Seminar on Problems of Theoretical and Applied Electron and Ion Optics; edited by A.M. Filachev. – SPIE: Bellingham, WA, 2003. – P. 52 – 58.

14. Petrovich, O.N. Influence of parameters of the plasma electron sources on the characteristics of narrow electron beam / O.N. Petrovich // Proceedings of SPIE. – Vol. 5398: Sixth Seminar on Problems of Theoretical and Applied Electron and Ion Optics; edited by A.M. Filachev. – SPIE: Bellingham, WA, 2004. – P. 91 – 97.

### **Статьи в сборниках материалов конференций**

15. Gruzdev, V.A. Models of the acceleration gaps and nonlinear phenomena by the ionization of the gas in theirs / V.A. Gruzdev, V.G. Zalessky, O.N. Petrovich // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings IV Annual seminar. – Polotsk, 1995. – P. 253 – 260.

16. Gruzdev, V.A. Nonlinear effects in electron-optical systems with the plasma emitter / V.A. Gruzdev, O.N. Petrovich // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings of the VIII Annual seminar; edited by L.Babichev&V.Kuvshinov. – Minsk, 1999. – P. 157 – 161.

17. Gruzdev, V.A. Dynamics of the free emitting surface in electron-optical systems with the big cross-section plasma emitter / V.A. Gruzdev, O.N. Petrovich // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings of the IX Annual seminar; edited by L.Babichev&V.Kuvshinov. – Minsk, 2000. – P. 221 – 222.

18. Груздев, В.А. Влияние ионизационных процессов на свойства электронно-оптических систем с плазменным эмиттером / В.А. Груздев, О.Н. Петрович // Наука и технологии на рубеже XXI века: материалы Международной научно-технической конференции; под ред. И.П. Филонова, Е.П. Сапелкина, Г.Я. Беляева. – Минск, 2000. – С. 227 – 237.

19. Petrovich, O.N. Simulation of nonlinear properties of dynamical electron-optical systems with the plasma ring emitter / O.N. Petrovich // Nonlinear phenomena in complex systems: proceedings of the X Annual seminar; edited by L.Babichev&V.Kuvshinov. – Minsk, 2001. – P. 257 – 259.

20. Петрович, О.Н. Алгоритм расчета электронно-оптических систем с плазменным эмиттером с учетом влияния ионизационного фактора / О.Н. Петрович // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы IV Международной конференции; под ред. В.М. Анищика [и др.]. – Минск, 2001. – С. 366 – 368.

21. Петрович, О.Н. Ионизационные процессы и электрическая прочность ускоряющего промежутка источника электронов с плазменным эмиттером большого сечения / О.Н. Петрович // Взаимодействие излучений с твердым телом:

материалы IV Международной конференции; под ред. В.М. Анищика [и др.]. – Минск, 2001. – С. 369 – 370.

22. Петрович, О.Н. Динамика формирования трубчатого пучка в электронно-оптических системах с кольцевым плазменным эмиттером / О.Н. Петрович // Надежность машин и техн. систем: материалы Международной научно-технической конференции: в 2т.; под ред. О.В. Берестнева. – Минск, 2001. – Т.2. – С. 135 – 136.

23. Стекольников, А.Ф. Компьютерное моделирование формирования пучка в источниках электронов на основе ВТР / А.Ф. Стекольников, О.Н. Петрович // Материалы 6 Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками. – Томск, 2002. – С. 159 – 160.

24. Petrovich, O.N. Computer simulation of influence of the ionization processes on dynamics of formation of electronic beams in plasma sources of the charged particles / O.N. Petrovich, V.A. Gruzdev, A.F. Stekolnikov // Proceedings of the XX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Tours, France, 2002. – P. 404 – 406.

25. Петрович, О.Н. К вопросу о влиянии давления на характеристики электронного пучка / О.Н. Петрович // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы II Международной научно-технической конференции: в 2т.; под ред. А.П. Достанко. – Новополоцк, 2002. – Т. I. – С. 42 – 44.

26. Петрович, О.Н. Стационарная задача формирования интенсивных электронных пучков с учетом возмущения эмитирующей плазмы обратным ионным потоком / О.Н. Петрович, А.Ф. Стекольников // Математические модели в образовании, науке и промышленности: сб. научных трудов. – С.-Пб.: С.-Пб. от. МАН ВШ, 2003. – С. 170 – 173.

27. Петрович, О.Н. Первичное формирование электронного пучка в плазменных источниках с катодным или анодным эмиттерным электродом / О.Н. Петрович // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы V Международной конференции; под ред. В.М. Анищика [и др.]. – Минск, 2003. – С. 383 – 386.

28. Петрович, О.Н. Стационарная задача численного моделирования характеристик электронного пучка / О.Н. Петрович // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы III Международной научно-технической конференции; под ред. А.П. Достанко. – Новополоцк, 2004. – С. 246 – 250.

29. Петрович, О.Н. Метод численного анализа газонаполненных ЭОС с подвижным плазменным катодом / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Труды Международной конференции по вычислительной математике, Новосибирск, 21-25 июня 2004г. : в 2 ч. / ИВМиМГ СО РАН; редкол.: Г.А. Михайлов [и др.]. – Новосибирск, 2004. – Ч.II. – С. 590 – 595.

30. Petrovich, O.N. Simulation of conditions of formation of a stationary big section beam in plasma electron sources / O.N. Petrovich // Proceedings of the XXI

International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Yalta, 2004. – Vol.2. – P. 545 – 546.

31. Петрович, О.Н. Алгоритм моделирования триодной электронно-оптической системы с плазменным эмиттером большого сечения / О.Н. Петрович // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы VI Международной конференции; под ред. В.М. Анищика [и др.]. – Минск, 2005. – С. 411 – 413.

### **Тезисы докладов на конференциях**

32. Петрович, О.Н. Исследование особенностей электронно-оптических систем с плазменным эмиттером / О.Н. Петрович // Материалы докладов международной 53-й НТК профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА: в 4 ч.; под ред. В.Б. Яржембицкого. – Минск, 1999. – Ч.2. – С. 75.

33. Петрович, О.Н. Компьютерное моделирование влияния ионизационных процессов на динамику формирования электронных пучков в плазменных источниках заряженных частиц / О.Н. Петрович // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов V Всероссийского семинара. – Москва, 2001. – С. 36 – 37.

34. Петрович, О.Н. Влияние давления на характеристики пучка в плазменных источниках электронов / О.Н. Петрович, А.Ф. Стекольников // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов V Всероссийского семинара. – Москва, 2001. – С. 40.

35. Stekolnikov, A.F. Simulation of formation of an intensive electron beam in bipolar electron-optical system with the plasma anode / A.F. Stekolnikov, O.N. Petrovich // Book of abstracts the International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion. – Alushta, 2002. – P. 157.

36. Петрович, О.Н. Моделирование влияния параметров электродной структуры и геометрии эмиссионного канала на характеристики формируемого электронного пучка / О.Н. Петрович, А.Ф. Стекольников // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов VI Всероссийского семинара. – Москва, 2003. – С. 23.

37. Петрович, О.Н. Моделирование триодной системы формирования пучка большого сечения в плазменных источниках электронов / О.Н. Петрович // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов VII Всероссийского семинара. – Москва, 2005. – С. 16.

38. Петрович, О.Н. Программа численного анализа динамической электронно-оптической системы с плазменным эмиттером / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов VIII Всероссийского семинара. – Москва, 2007. – С. 106 – 108.

39. Петрович, О.Н. Нестационарная задача нелинейной электронной оптики в плазменных источниках электронов / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов IX Всероссийского семинара. – Москва, 2009. – С. 15.

40. Свешников, В.М. Расчет ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области / В.М. Свешников, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов X Всероссийского семинара. – Москва, 2011. – С. 13 – 14.

41. Петрович, О.Н. Механизмы снижения электрической прочности в ПИЭЛ с эмиттером большого сечения / О.Н. Петрович, В.Г. Залесский // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов X Всероссийского семинара. – Москва, 2011. – С. 68 – 69.

42. Петрович, О.Н. Программный комплекс ELIS для моделирования плазменных процессов в ЭОС / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики: тезисы докладов X Всероссийского семинара. – Москва, 2011. – С. 15 – 17.

## РЭЗІЮМЭ Пятровіч Вольга Мікалаеўна

### Мадэліраванне электронна-аптычных сістэм з плазменным эмітарам

**Ключавыя словы:** камп'ютарнае мадэліраванне, электронна-аптычныя сістэмы (ЭАС), плазменны эмітар, плазменныя крыніцы электронаў, іанізацыйныя працэсы, электронныя пучкі.

**Мэта даследавання:** распрацоўка метадаў мадэліравання ЭАС з плазменным эмітарам, стварэнне пакета прыкладных праграм (ППП) для разліку электронна-аптычных сістэм з плазменным эмітарам.

**Метады даследавання:** фізіка-матэматычнае мадэліраванне; метады лікавага аналізу газанапоўненых ЭАС: канчатковых рознасцяў, дэфармаваных трубак току, лікавага інтэгравання, гідрадынамічнага апісання струменяў іонаў і парных электронаў; ітэрацыйныя метады; метады камп'ютарнага мадэліравання.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацаваны арыгінальны метады лікавага аналізу ЭАС з плазменным катодам, аснову якога складаюць алгарытмы разліку плазменнай мяжы, працэсаў іанізацыі і другаснай эмісіі, рэжымаў эмісіі, руху струменяў усіх тыпаў зараджаных часціц.

Створаны ППП ELIS для мадэліравання стацыянарных і нестацыянарных нелінейных самаўзгодненых задач электроннай аптыкі з рухомай плазменнай мяжой.

Даследаваны ўплыў параметраў ЭАС і эмітыраванай плазмы на характарыстыкі пучка электронаў. Усталяваны крытычныя значэнні ціску і крытэрыі пераходу да нестацыянарнага рэжыму фарміравання пучка. Знойдзены ўмовы фарміравання у паскаральным прамежку другаснай плазмы. Даследаваны ўплыў эвалюцыі другаснай плазмы на электронна-аптычныя ўласцівасці паскаральнага прамежку і характарыстыкі пучка. Усталяваны механізмы паніжэння электрычнай трываласці прамежку паскарэння.

**Ступень выкарыстання:** ППП ELIS і вынікі лікавага аналізу былі скарыстаныя пры распрацоўцы і аптымізацыі эксперыментальнай канструкцыі крыніцы электронаў на РУП МТЗ.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** ППП ELIS дазваляе праводзіць аналіз уплыву розных фізічных умоў на фарміраванне пучка і вырашаць задачу аптымізацыі ЭАС з плазменным эмітарам, што забяспечвае скарачэнне тэрмінаў і кошт этапаў праектавання і аптымізацыі канструкцый тэхналагічных электронных пушак. Пакет праграм дапоўнены алгарытмамі, якія пашыраюць вобласць яго прымянення для мадэліравання пушак з цвёрдым катодам.

## РЕЗЮМЕ

Петрович Ольга Николаевна

### Моделирование электронно-оптических систем с плазменным эмиттером

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, электронно-оптические системы (ЭОС), плазменный эмиттер, плазменные источники электронов (ПИЭЛ), ионизационные процессы, электронные пучки.

**Цель исследования:** разработка методов моделирования ЭОС с плазменным эмиттером, создание пакета прикладных программ (ППП) для расчета ПИЭЛ.

**Методы исследования:** физико-математическое моделирование; методы численного анализа газонаполненных ЭОС: конечных разностей, деформируемых трубок тока, численного интегрирования, гидродинамического описания потоков ионов и парных электронов; итерационные методы; метод компьютерного моделирования.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработан оригинальный метод численного анализа ЭОС с плазменным катодом, основу которого составляют алгоритмы расчета плазменной границы, процессов ионизации и вторичной эмиссии, режимов эмиссии, движения потоков всех видов заряженных частиц.

Создан ППП ELIS для моделирования стационарных и нестационарных нелинейных самосогласованных задач электронной оптики с подвижной плазменной границей.

Исследовано влияние параметров ЭОС и эмитирующей плазмы на характеристики пучка электронов. Установлены критические значения давления и критерий перехода к нестационарному режиму формирования пучка. Найдены условия образования в ускоряющем промежутке ПИЭЛ вторичной плазмы. Исследовано влияние эволюции вторичной плазмы на электронно-оптические свойства ускоряющего промежутка и характеристики пучка. Установлены механизмы снижения электрической прочности промежутка ускорения.

**Степень использования:** ППП ELIS и результаты численного анализа были использованы при разработке и оптимизации экспериментальной конструкции источника электронов на РУП МТЗ.

**Рекомендации по использованию:** ППП ELIS позволяет проводить анализ влияния различных физических условий на формирование пучка и решать задачу оптимизации ЭОС ПИЭЛ, что обеспечивает сокращение сроков и стоимости этапов проектирования и оптимизации конструкций технологических электронных пушек. Пакет программ дополнен алгоритмами, расширяющими область его применения для моделирования пушек с твердым катодом.

## SUMMARY

**Petrovich Olga Nikolaevna**

### **Simulation of electron-optical systems with the plasma emitter**

**Keywords:** computer simulation, electron-optical systems (EOS), the plasma emitter, plasma electron sources (PES), ionization processes, electron beams.

**Research objective:** development of methods for simulation of EOS with the plasma emitter and creation of the software package for calculation of PES.

**Research methods:** physical and mathematical modeling; numerical methods of the analysis of gas-filled EOS: finite difference methods, the method of deformable current tubes, methods of numerical integration, the method of hydrodynamic description of ion and pair electron streams; iteration methods; a computer simulation method.

**The obtained results and their novelty.** The original method for numerical analysis of EOS with the plasma cathode based on algorithms of plasma edge calculation, processes of ionization and secondary emission, emission modes, movement of streams of all kinds of charged particles has been developed.

The software package ELIS for simulation of the stationary and non-stationary nonlinear self-coordinated problems of electronic optics with movable plasma edge has been created.

The influence of parameters of EOS and emitting plasma on electron beam characteristics has been investigated. The critical pressure values and the criterion of transition to a non-stationary condition of beam formation have been established. The conditions of secondary plasma formation in the accelerating gap of PES have been found. The influence of secondary plasma evolution on the electron-optical properties of the accelerating gap and beam characteristics has been investigated. The mechanisms of decrease in the electric strength of the acceleration gap have been established.

**The level of application:** the software package ELIS and the results of the numerical analysis have been used at the development and optimization of an experimental design of an electron source at Minsk tractor plant.

**Recommendations for use:** the software package ELIS allows to analyze the influence of various physical conditions on beam formation and solve the problem of optimization of EOS with the plasma emitter that reduces the terms and cost of design and optimization stages of technological electron guns. The software package is added by the algorithms expanding the area of its application for simulation of guns with the solid-state cathode.