

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

УДК 537.533 : 533.9.03 : 621.384

АНТОНОВИЧ  
ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКС  
НА ОСНОВЕ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Новополоцк, 2009

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  
Учреждения образования «Полоцкий  
государственный университет»

Официальные оппоненты: ПОБОЛЬ Игорь Леонидович,  
доктор технических наук, доцент,  
директор НТЦ «Плазмотег»,  
заведующий лабораторией электрофизики  
ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»

СМЯГЛИКОВ Игорь Петрович,  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
физики плазменных ускорителей  
ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси»

Оппонирующая организация – Учреждение образования «Белорусский  
государственный университет информатики  
и радиоэлектроники»

Защита состоится 18 сентября 2009 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.19.03 при УО «Полоцкий государственный университет» по адресу: ул. Блохина 29, г. Новополоцк, Витебская область, 211440, тел. ученого секретаря 8(0214) 53-10-47.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке УО «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан 14 августа 2009 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



А.Л. Лисовский

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевые технологии относят к высокоэффективным методам металлообработки и получения материалов с новыми свойствами. Однако несмотря на то, что в структуре промышленности Беларуси предприятия машино- и приборостроительного профиля имеют большую долю, объем применения электронно-лучевых технологий на них незначителен. Это обусловлено главным образом тем, что производство собственных электронно-лучевых энергокомплексов в Беларуси отсутствует, а стоимость импортных составляет величину порядка 0,5 – 1 млн. долларов. Поэтому модернизация имеющегося или разработка нового электронно-лучевого оборудования отечественного производства позволит расширить область применения электронно-лучевых технологий в промышленности республики и будет способствовать выполнению программ энерго- и ресурсосбережения, а также решению проблемы импортозамещения в области обеспечения электронно-лучевым оборудованием предприятий Беларуси.

Традиционно в качестве источников электронов в электронно-лучевых установках используются термокатодные электронные пушки, обладающие наряду с таким достоинством, как высокое качество электронного пучка, и рядом недостатков, которые отсутствуют у источников электронов с плазменным эмиттером. Функциональные и эксплуатационные характеристики плазменных источников электронов (ПИЭЛ) показали не только перспективность их применения для реализации существующих электронно-лучевых технологий обработки материалов, но и возможности расширения использования электронных пучков. Применение ПИЭЛ в качестве генератора технологических электронных пучков требует создания соответствующих систем электропитания и управления, обеспечивающих технологические требования к стабильности выходных параметров и устойчивости систем к различным дестабилизирующим факторам. Поскольку для всех генераторов плазмы в различных режимах характерна нелинейная зависимость интенсивности ионизационных, эмиссионных и других процессов в плазме от большого количества факторов как при генерации эмиттирующей плазмы, так и при формировании электронных пучков, то это вызывает трудности при формировании электронных пучков со стабильными параметрами. В настоящее время механизмы формирования эмиссионного тока в ПИЭЛ не являются до конца изученными. В связи с этим настоящая работа, направленная на исследование основных факторов, определяющих технологические параметры ПИЭЛ, поиск способов управления этими параметрами, разработку оптимальных (учитывающих особенности) систем электропитания ПИЭЛ и в целом электронно-лучевого энергокомплекса с плазменным источником электронов отечественного производства, представляется актуальной.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Исследования проводились в рамках Государственной программы фундаментальных и опытно-исследовательских работ по заданию «Плазменная динамика 02» (2003 – 2005 гг.) – «Теоретические и экспериментальные исследования эффективности переключения электронного тока в плазменных источниках электронов с замагниченной эмиттирующей плазмой» (№ гос. регистрации 2002801), Государственной программы прикладных научных исследований «Материалы в технике» (задание 1.36.2) совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси «Разработка процессов и технологических основ получения изделий из отходов тугоплавких металлов электронно-лучевым переплавом» (№ гос. регистрации 20072125), задания Министерства образования «Исследование физических характеристик и технологических возможностей электронных пучков пушек с плазменным эмиттером» (№ гос. регистрации 20061820), гранта Министерства образования «Электронно-лучевой энергокомплекс на базе пушек с плазменным эмиттером» (№ гос. регистрации 2001343), а также госбюджетных научно-исследовательских работ, выполняемых в Полоцком государственном университете в 1999 – 2004 годах по темам: «Исследование условий формирования в плазменных источниках электронов пучков большого сечения с заданным распределением тока» (№ гос. регистрации 2000906), «Разработка экспериментального образца источника электронов с пучком большого сечения» (№ гос. регистрации 2000908).

### **Цель и задачи исследования**

*Целью работы* является создание универсального энерго- и ресурсосберегающего отечественного технологического электронно-лучевого энергокомплекса на основе электронных пушек с плазменным эмиттером со стабильными эмиссионными характеристиками для электронно-лучевой обработки материалов. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие *задачи*:

- провести анализ существующих электронно-лучевых энергокомплексов, их характеристик и опыта применения плазменных источников электронов в технологических электронно-лучевых энергокомплексах;

- изучить особенности физических процессов переключения электронного тока из плазмы в эмиссионный канал в эффективных газоразрядных структурах плазменных источников электронов и влияние на характеристики газоразрядных структур конфигураций электрического и магнитного полей, реализуемых в них;

- исследовать возмущение эмиттирующей плазмы при отборе электронов в эмиссионный канал газоразрядной структуры;

- установить способы стабилизации эмиссионного тока из газоразрядной структуры плазменного источника электронов;

- разработать электронно-лучевые устройства на основе плазменных эмиттеров для электронно-лучевой сварки при повышенном давлении в технологической камере и для термической модификации внутренних цилиндрических поверхностей;

- разработать систему электропитания плазменных эмиттеров, позволяющую реализовать непрерывный и импульсный режимы работы различных электронно-лучевых устройств с достаточным уровнем стабильности параметров;

- осуществить технологическую апробацию экспериментального электронно-лучевого энергокомплекса.

**Объектом исследования** являются электродные структуры, в которых возбуждается газовый разряд, плазма газового разряда, электронный пучок, системы электропитания плазменных источников электронов.

**Предмет исследования** – взаимосвязь характеристик разрядов, эмиссионных свойств плазмы, условий переключения электронов из газоразрядной плазмы в электронный пучок, способы управления параметрами пучка.

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

1. Распределение электронного тока между электродами газоразрядной структуры и эмиссионным каналом в существенной степени определяется двумя механизмами: изменением падения потенциала в приэлектродных слоях и ранее не рассматривавшимся формированием электрического поля в плазме, повышающего ионизационную способность плазменных электронов, а не только соотношением площадей электродов газоразрядной структуры и эмиссионного канала, как было принято считать ранее.

2. При увеличении эффективности извлечения электронов в плазменном источнике электронов усиливается возмущение эмиттирующей плазмы, которое можно отождествить с дополнительным энерговкладом в разряд от источника напряжения ускорения электронного пучка. В результате такого возмущения параметры плазменного эмиттера становятся зависимыми от эффективности извлечения, ускоряющего напряжения и ионизационных процессов в ускоряющей промежутке, а схмотехническая стабилизация тока разряда не обеспечивает в достаточной степени стабильность тока эмиссии (пучка).

3. Включение сопротивлений смещения потенциала в цепи электродов газоразрядной структуры плазменного источника электронов обеспечивает не только перераспределение токов в газоразрядной структуре и эффективное извлечение электронов из плазмы, но и автоматическую стабилизацию тока эмиссии (пучка).

4. Разработанная оригинальная система электропитания плазменного эмиттера осуществляет в достаточной для технологического применения степени регулирование и стабилизацию тока эмиссии, автоматическую подачу импульса напряжения выше напряжения зажигания при случайных погасаниях разряда и обеспечивает работу плазменного эмиттера в стационарном и импульсном режимах.

### **Личный вклад соискателя**

Соискатель принимал непосредственное участие в проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, обобщении теоретических результатов, установлении новых закономерностей, а также во внедрении результатов в производство. Вклад соавторов совместных публикаций состоял в научном руководстве, корректировке цели и задач исследований, обсуждении полученных результатов.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на V, VI Республиканской конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гродно, 23 – 25 апреля 2000 г., Витебск, 17 – 19 октября 2001 г.); III, V международных конференциях «Физика плазмы и плазменные технологии – ФППТ-3, ФППТ-5» (Минск, 18 – 22 сентября 2000 г., 2006 г.); IV международной научно-технической конференции «Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов» (Гродно, 11 – 13 октября 2000 г.); международной научно-технической конференции «Упрочнение, восстановление и ремонт на рубеже веков» (Новополоцк, 17 – 19 апреля 2001 г.); V симпозиуме Беларуси, Сербии и Черногории по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы. ФДП-V 2004 (Минск, 20 – 23 сентября 2004 г.); 3-й международной выставке «Электротехнология» (Санкт-Петербург 25 – 26 мая 2005 г.); II международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Уде, 17 – 24 июня 2006 г.); VI, VII международных научно-технических конференциях «Материалы, технологии и оборудование в производстве, в ремонте и модернизации машин» (Новополоцк, 27 – 29 марта 2007 г., 2009 г.); V международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 29 – 30 мая 2008 г.).

### **Опубликованность результатов**

Основное содержание диссертации отражено в 28 научных работах, из них: 10 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, 4 – в сборниках научных трудов, 7 – в сборниках материалов конференций, 5 – в сборниках тезисов (рефератов) докладов, 2 – в описаниях к патентам на полезную модель.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 155 страниц. Работа содержит 66 иллюстраций на 37 страницах, 3 таблицы на 2 страницах, приложения на 7 страницах. Список использованных источников на 11 страницах включает в себя 136 наименований, из них 28 – авторские публикации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во *введении* обоснована актуальность исследований по выбранной теме, в виде аннотации изложено состояние вопроса, определены основные направления работы.

В *первой главе* рассмотрены общие принципы построения электронно-лучевых энергокомплексов, их типичные характеристики. На основе анализа структурных и принципиальных схем элементов типового сварочного электронно-лучевого энергокомплекса рассмотрены основные причины, влияющие на стабильность выходных параметров энергокомплекса. Отмечено, что энергокомплексы с термокатодным источником электронов наряду с таким достоинством, как высокое качество электронного пучка, обладают рядом эксплуатационных недостатков. Анализ литературных данных показал, что в большинстве электронно-лучевых технологий термокатоды могут быть успешно заменены плазменными эмиттерами.

Рассмотрены технологические возможности известных электронно-лучевых энергокомплексов. Показано, что использование в них ПИЭЛ требует ряда изменений в структуре энергокомплексов, обусловленных принципами действия ПИЭЛ. На основе анализа показано, что при типичных ускоряющих напряжениях, используемых в технологических электронно-лучевых установках (30 – 50 кВ), электронные пучки с плотностью тока и яркостью, сравнимыми с обеспечиваемыми термокатодом, формируются плазменными эмиттерами двух типов: на основе отражательного разряда с полым катодом и разряда в скрещенных  $E \times H$  полях. Требуемая плотность эмиссионного тока в разрядах с полым катодом достигается в основном за счет формирования сильно неоднородной плазмы с максимумом плотности в области эмиссионного канала, в разрядах со скрещенными  $E \times H$  полями – за счет создания условий для дрейфа электронов в область эмиссии практически из всего объема плазмы. Рассмотренные ПИЭЛ при незначительных конструктивных изменениях могут быть использованы для формирования как сфокусированных пучков, так и пучков большего сечения в стационарном и импульсном режимах. Это способствует расширению возможного спектра технологий на базе одного энергокомплекса, что в ряде случаев экономически выгодней, чем применение специализированных энергокомплексов. Подобную универсализацию энергокомплекса целесообразно учитывать при разработке блока питания разряда плазменного источника электронов. Рассмотрена возможность применения в энергокомплексах на основе ПИЭЛ блоков электропитания существующих энергокомплексов. Показано, что требования к аналогичным блокам энергокомплексов с термокатодным и плазменным эмиттерами электронов близки. Однако хотя и существует возможность их использования в энер-

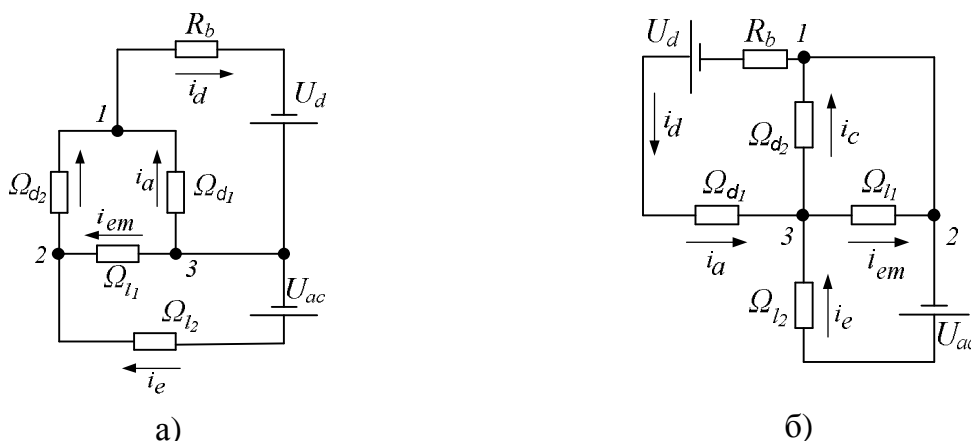
гокомплексах на основе ПИЭЛ, целесообразность этого необходимо рассматривать в каждом конкретном случае.

Проанализированы существующие системы электропитания плазменных эмиттеров. Отмечено, что опубликованные к началу работы схемы электропитания плазменных эмиттеров выполнены в основном без учета особенностей физических процессов в ПИЭЛ, что вызывает трудности в универсализации энергокомплексов и стабилизации их выходных параметров.

В заключение главы на основании проведенного анализа сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию механизмов формирования эмиссионного тока, выявлению основных дестабилизирующих ток эмиссии факторов, разработке способов управления и стабилизации тока эмиссии, методике построения модели плазменного эмиттера.

Представлены типичные варианты подключения плазменного эмиттера к системе электропитания. В зависимости от потенциала эмиттерного электрода для двух предельных случаев катодного и анодного потенциала плазменные эмиттеры можно представить в виде эквивалентных электрических схем с учетом проводимости разрядного и ускоряющего промежутков (рисунок 1).



а)

б)

1 – катод; 2 – эмиттерный электрод; 3 – анод;

$\Omega_{d1}$  – проводимость плазмы в области анода;

$\Omega_{d2}$  – проводимость плазмы в области эмиттерного электрода;

$\Omega_{e1}$  – проводимость плазмы в области эмиссионного канала;

$\Omega_{l2}$  – проводимость ускоряющего промежутка;  $U_d$  – напряжение горения разряда;

$U_{ac}$  – ускоряющее напряжение;  $R_b$  – балластное сопротивление

**Рисунок 1 – Эквивалентные электрические схемы плазменных эмиттеров в случае анодного (а) и катодного (б) потенциала эмиттерного электрода**

Анализ схем позволяет предположить существование двух механизмов формирования эмиссионного тока: за счет перераспределения токов между эмиттерным электродом и эмиссионным каналом вследствие перестройки пристеночного слоя вблизи эмиттерного электрода (без существенного изме-



нения параметров газоразрядной плазмы) и за счет переключения тока из объема плазмы, сопровождаемого возникновением дополнительного потока плазменных электронов в область эмиссии, перераспределением токов между всеми электродами газоразрядной структуры, изменением параметров плазмы и условий горения разряда. На основании этого можно ввести коэффициенты переключения  $\eta$  и  $\zeta$  (по аналогии с работами К.Н. Ульянова), характеризующие соответствующие механизмы переключения. Тогда токи на электродах разрядной камеры можно определить по выражениям:

$$i_a = (1 - \eta)i_d; \quad i_{em} = (1 - \zeta)\eta i_d; \quad i_e = \zeta\eta i_d, \quad (1)$$

где  $i_a$  – ток анода;

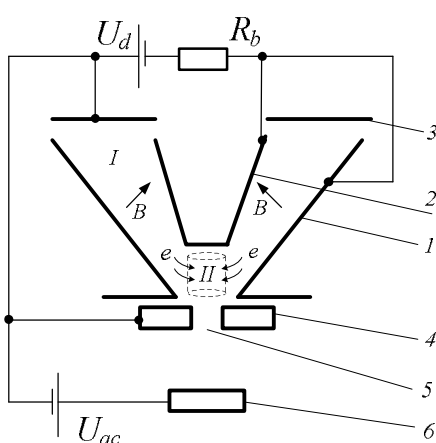
$i_d$  – ток разряда;

$i_{em}$  – ток эмиттерного электрода;

$i_e$  – ток эмиссии.

Видно, что эффективность извлечения  $\alpha = i_e/i_d = \zeta\eta$ , характеризующая эмиссионную способность плазменного эмиттера, в общем случае определяется двумя процессами (механизмами переключения).

На основании предложенных механизмов формирования эмиссионного тока разработана модель плазменного эмиттера со скрещенными  $E \times H$  полями, учитывающая возможность формирования электрического поля в плазме и зависимость потенциала плазмы от эффективности извлечения (ускоряющего напряжения). В газоразрядной плазме рассматриваемого эмиттера можно условно выделить две области (рисунок 2). Вблизи эмиссионного канала (область II) вследствие малости объема ионизационными процессами можно пренебречь. Плазма в этой области формируется за счет диффузии из области, где реализуются основные ионизационные процессы (область I).



- 1 – внешний катод; 2 – внутренний катод;  
 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод;  
 5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий электрод;  
 $U_d$  – напряжение горения разряда;  
 $U_{ac}$  – ускоряющее напряжение;  
 $R_b$  – балластное сопротивление;  
 $B$  – индукция магнитного поля

**Рисунок 2 – Электродная структура разряда со скрещенными  $E \times H$  полями в случае анодного потенциала эмиттерного электрода**

В модели использовались следующие предположения:

- реакция газоразрядной плазмы на извлечение электронов приведет к повышению ее потенциала и возникновению электрического поля на границе областей и в области I, обеспечивающего дополнительный дрейф плазменных электронов из области I в область II;

- в области анода индукция магнитного поля такова, что выполняется условие:  $l_a < r_L$ , где  $l_a$  – протяженность прианодного слоя;  $r_L$  – ларморовский радиус для электронов, что позволяет использовать понятие анодного падения потенциала.

В таком приближении, с учетом выражения Бома для плотности тока ионов:

$$j_b(n) = 0,4\sqrt{2}en\sqrt{\frac{T_e}{m_i}}, \quad (2)$$

и выражения для тепловой плотности тока электронов:

$$j_T(n) = 0,25env_T = en\sqrt{\frac{T_e}{2\pi m_e}}, \quad (3)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$n$  – концентрация плазмы;

$v_T$  – средняя тепловая скорость электронов в плазме;

$T_e$  – электронная температура в электронвольтах;

$m_i, m_e$  – массы иона и электрона,

токи на соответствующие электроды можно оценить уравнениями:

$$\begin{aligned} i_{em} &= \left( j_T(n_{em}) \exp\left(-e \frac{\Phi_{em}}{T_e}\right) - j_b(n_{em}) \right) S_{em}; \\ i_a &= \left( j_T(n_a) \exp\left(-e \frac{\Phi_a}{T_e}\right) - j_b(n_a) \right) S_a; \\ i_d &= (1 + \gamma) j_b(n_a) S_c, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n_a, n_{em}$  – концентрация плазмы в областях  $I$  и  $II$  соответственно;

$\Phi_a, \Phi_{em}$  – соответственно падения потенциала в прианодном и приэлектродном слоях эмиттерного электрода относительно потенциала плазмы;

$S_{em}, S_a, S_c$  – площади эмиттерного электрода, анода и катода соответственно;

$\gamma$  – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности катода.

Поскольку эмиссия электронов в плазменном эмиттере этого типа осуществляется через эмиссионный канал, то зависимость параметров плазмы от эффективности извлечения определяется положением и площадью эмиттирующей плазменной поверхности. Поэтому в зависимости от величины ускоряющего напряжения и геометрии эмиссионного канала учитывалась возможность формирования эмиссионной поверхности плазмы для трех практически значимых случаев: эмиссионная поверхность находится в канале, а эмиссия осуществляется как через потенциальный барьер, так и в его

отсутствие; эмиссионная поверхность находится вне эмиссионного канала. В случае эмиссии электронов через потенциальный барьер

$$i_e = j_T(n_e) \exp\left(-e \frac{\Phi_{em} - DU_{ac}}{T_e}\right) S_e, \quad (5)$$

где  $n_e$  – концентрация плазмы вблизи эмиттирующей плазменной поверхности;  $D$  – коэффициент электрической проницаемости эмиссионного канала;  $U_{ac}$  – ускоряющий потенциал;  $S_e$  – площадь эмиттирующей поверхности плазмы, а уравнение непрерывности тока на границе раздела областей  $I$  и  $II$ :

$$(j_E + j_D)S_{II} = j_T(n_e) \exp\left(-e \frac{\Phi_{em} - DU_{ac}}{T_e}\right) S_e + j_T(n_a) \exp\left(-e \frac{\Phi_{em}}{T_e}\right) S_{em}, \quad (6)$$

где  $j_E = en_a \mu_{e\perp} E$  – плотность дрейфового тока поперек магнитного поля через границу раздела областей с напряженностью электрического поля в плазме  $E$ ;

$j_D = \frac{j_T(n_a)}{\sqrt{1 + \sigma^2}}$  – плотность тока диффузии поперек магнитного поля;

$\mu_{e\perp} = \frac{e\lambda_e}{m_e v_T} \frac{1}{1 + \sigma^2}$  – подвижность электронов поперек магнитного поля;

$\lambda_e$  – длина пробега электронов вдоль магнитного поля;

$\sigma = \frac{m_e v_T}{eB\lambda_e}$  – фактор, учитывающий влияние поперечного движения электронов магнитного поля с индукцией  $B$ .

В случае эмиссии электронов из плазмы в отсутствие потенциального барьера плотность тока эмиссии достигает насыщения ( $i_e = j_T(n_e)S_e$ ). Пренебрегая долей электронов, уходящих из плазмы через часть площади сечения эмиссионного канала, перекрытого слоем, баланс токов на границе раздела областей  $I$  и  $II$  может быть определен выражением:

$$(j_E + j_D)S_{II} = j_T(n_e)S_e + j_T(n_a) \exp\left(-e \frac{\Phi_{em}}{T_e}\right) S_{em}. \quad (7)$$

Боковую поверхность  $S_{II}$  плазменного столба в области  $II$  оценим как  $S_{II} = 2\pi r_{em} l_{pl} = 2l_{pl} \sqrt{S_{em}}$ , где учтено, что площадь поверхности эмиттерного электрода  $S_{em} = \pi r_{em}^2$ . Параметр  $l_{pl}$  соответствует высоте плазменного столба в области  $II$ .

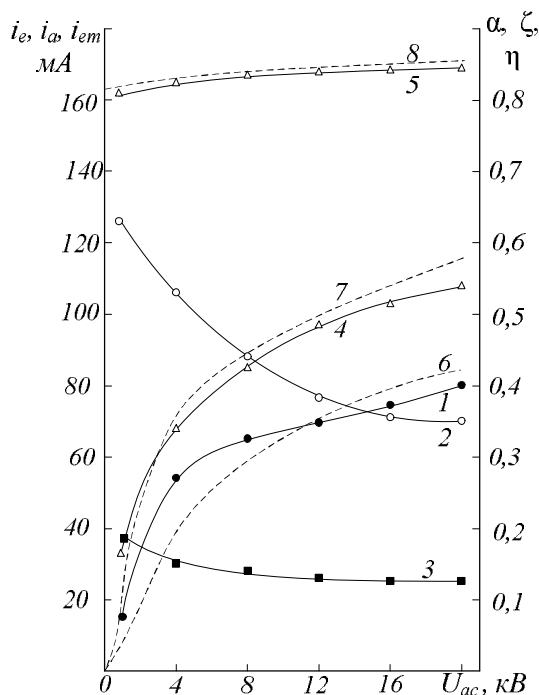
Учитывая, что потенциалы плазмы (относительно единого для анода и эмиттерного электрода потенциала) вблизи анода  $\Phi_a$  и вблизи эмиттерного электрода  $\Phi_{em}$  неравны, разность потенциалов между этими электродами мож-

но оценить через усредненную напряженность поля  $E$ , возникающего в плазме вследствие извлечения электронов из плазмы в эмиссионный канал:

$$\Phi_{em} = \Phi_a + EL_{pl}, \quad (8)$$

где параметр  $L_{pl}$  можно приближенно считать равным длине плазменного столба между анодом и эмиттерным электродом. За положительное направление напряженности поля  $E$  выбиралось направление, способствующее дрейфу электронов в область эмиссии.

На рисунке 3 показаны зависимости параметров переключения и эффективности извлечения, полученные на основе распределения токов, измеренных в экспериментах, и рассчитанные при аналогичных внешних условиях



1 –  $i_e$ ;  $\alpha_{экс.}$ ; 2 –  $i_{em}$ ; 3 –  $i_a$ ; 4 –  $\zeta_{экс.}$ ;  
5 –  $\eta_{экс.}$ ; 6 –  $\alpha_{теор.}$ ; 7 –  $\zeta_{теор.}$ ; 8 –  $\eta_{теор.}$ .

**Рисунок 3 – Экспериментальные и расчетные зависимости токов на электроды и параметров переключения для одинаковой геометрии эмиссионного канала**

тока эмиссии, поскольку параметры переключения и эффективность извлечения оказываются зависимыми от ускоряющего напряжения, неоднородности распределения концентрации и формирующихся в плазме токов. Поэтому для получения стабильного тока пучка при разработке схемы электропитания плазменного эмиттера необходимо стабилизировать именно ток эмиссии.

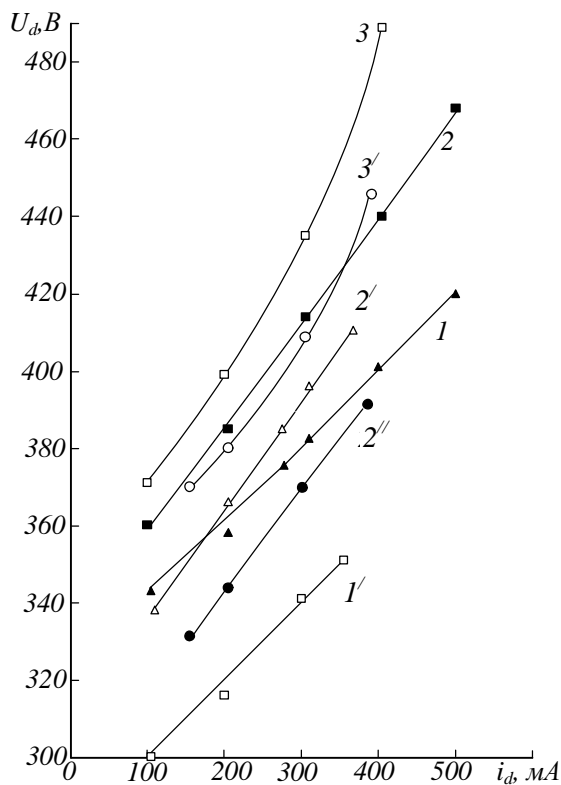
Формирование электрического поля в плазме способствует увеличению ионизационной способности плазменных электронов, что делает зависимым кон-

и геометрических параметрах для рассматриваемой газоразрядной структуры. Их удовлетворительное совпадение свидетельствует об адекватности предложенной модели.

Предложенные механизмы формирования эмиссионного тока и соответствующие им коэффициенты  $\eta$  и  $\zeta$  носят универсальный характер и могут применяться для плазменных эмиттеров различного типа.

На основании предложенной модели и экспериментальных данных установлено, что ток эмиссии формируется в результате совместного действия двух механизмов переключения и ток разряда при этом может распределяться между электродами произвольным образом, а не только в соответствии с соотношением площадей. На основании этого сделан вывод, что схмотехническая стабилизация тока разряда не гарантирует стабильности

центрацию плазмы от эффективности извлечения (ускоряющего напряжения). Определяющую роль ионизационных процессов в плазме, обеспечивающую



- 1, 1' –  $Q = 100 \text{ атм}\cdot\text{см}^3/\text{ч}$ ;  
 2, 2', 2'' –  $Q = 85 \text{ атм}\cdot\text{см}^3/\text{ч}$ ;  
 3, 3' –  $Q = 40 \text{ атм}\cdot\text{см}^3/\text{ч}$ ;  
 1, 2, 3 – без извлечения;  
 1', 2', 3' –  $U_{ac} = 12 \text{ кВ}$ ; 2'' –  $U_{ac} = 20 \text{ кВ}$

**Рисунок 4 – Вольтамперная характеристика источника электропитания разряда**

ного извлечения электронов из плазмы, соответствующий доле общей мощности, которую необходимо вкладывать от источника питания разряда для поддержания эффективности извлечения плазменного эмиттера на заданном уровне. Анализ возмущения плазмы с этой точки зрения показал, что появление в плазме электрического поля при извлечении электронов можно интерпретировать как возникновение в плазменном эмиттере положительной обратной связи между параметрами разряда и ускоряющим напряжением (током эмиссии), когда источник ускоряющего напряжения обеспечивает определенный энерговклад в разряд. Это подтверждается снижением относительной мощности, потребляемой от источника питания разряда, в зависимости от эффективности извлечения и повышением энергетической эффективности плазменного источника с ростом эффективности извлечения (рисунок 5). В такой ситуации стабилизация режима ПИЭЛ регулированием параметров одного ис-

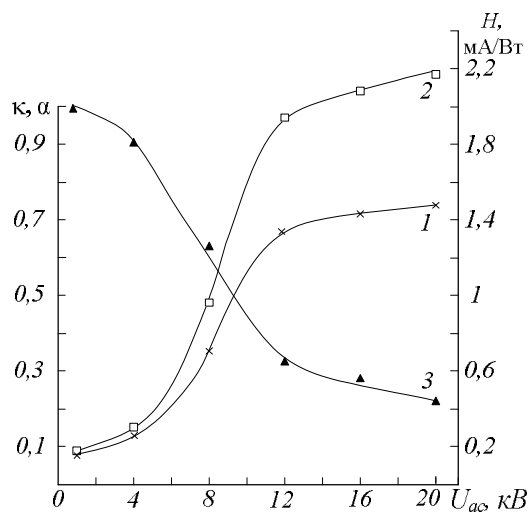
реакцию плазменного эмиттера на отбор электронов, косвенным образом подтверждает смещение вольтамперных характеристик (рисунок 4), которое наблюдается как с ростом давления (кривые 1, 2, 3), так и при неизменном давлении, но с увеличением тока эмиссии (кривые 2, 2', 2''). Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие влияние извлечения электронов на параметры плазменного эмиттера (ток и напряжение горения разряда). Предложено рассматривать реакцию плазмы с энергетической точки зрения. Для этого использован известный параметр – энергетическая эффективность ПИЭЛ:  $H = i_e / (i_d U_d) = \alpha / U_d$ , и введен дополнительный параметр относительной мощности, потребляемой от источника электропитания разряда:

$$\kappa = \frac{U_d i_d (1 - \alpha)}{U_{d0} i_{d0}}, \quad (9)$$

где  $U_{d0}$  и  $i_{d0}$  – напряжение горения и ток разряда в отсутствие принудительного

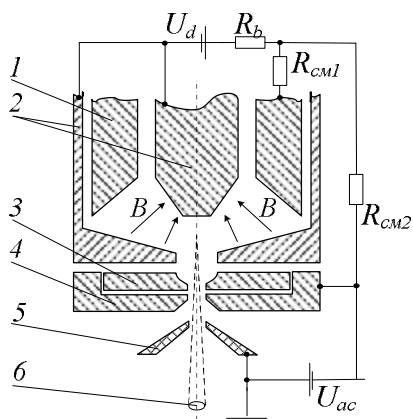
точника электропитания (например, блока питания разряда) для обеспечения постоянства тока эмиссии может оказаться недостаточно эффективной.

На основе уравнения баланса энергии в разряде рассмотрены факторы, наиболее влияющие на проводимость плазмы при различных условиях эмиссии.



**Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости эффективности извлечения  $\alpha$  (1), энергетической эффективности  $H$  (2) и относительной мощности  $k$  (3) от ускоряющего напряжения для  $Q = 80$  атм·см<sup>3</sup>/ч**

Представлены способы управления эффективностью извлечения, основанные на предложенных механизмах формирования эмиссионного тока. Первый



- 1 – анод; 2 – внешний и внутренний катоды;
- 3 – вставка в эмиттерный электрод;
- 4 – эмиттерный электрод;
- 5 – экстрактор; 6 – электронный пучок

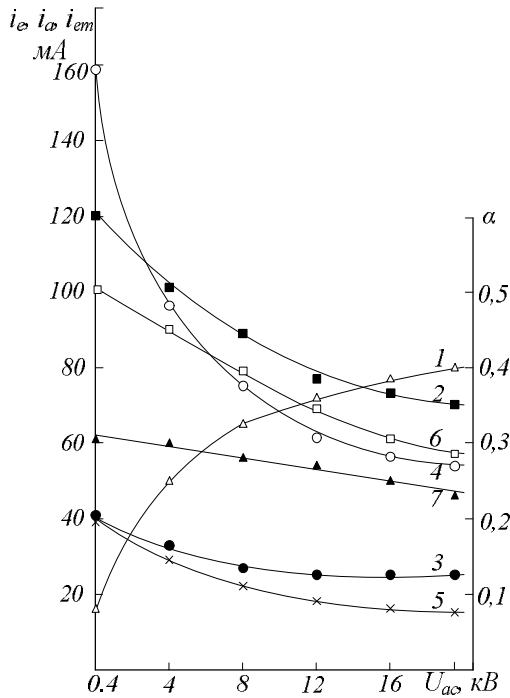
**Рисунок 6 – ПИЭЛ с анодным потенциалом эмиттерного электрода**

способ основан на управлении перераспределением токов в разряде за счет изменения параметров слоя пространственного заряда вблизи эмиттерного электрода. Он может быть реализован включением сопротивления смещения потенциала (рисунок б) в цепь одного из электродов (анода –  $R_{cm1}$  или эмиттерного электрода –  $R_{cm2}$ ). С увеличением тока на электрод потенциал этого электрода изменяется относительно его потенциала в отсутствие  $R_{cm}$  на величину падения напряжения на  $R_{cm}$  ( $i_a R_{cm1}$  или  $i_{em} R_{cm2}$ ). Соответственно изменяется и падение напряжения в слое между этим электродом и плазмой, а также величина электронного тока на электрод. При постоянном токе разряда включение  $R_{cm}$  в цепь эмиттерного электрода приводит к автостабилизации тока эмиссии, включение  $R_{cm}$  в цепь анода приводит к перераспределению токов и увеличению эффективности извлечения (рисунок 7).

Второй способ управления эффективностью извлечения заключается в формировании потоков электронов в области эмиссионного канала за счет применения магнитных и немагнитных вставок в эмиттерный электрод под

анодным или плавающим потенциалом (см. рисунок 6). Эксперименты с такими вставками показали, что структуры с немагнитной вставкой под плавающим потенциалом обеспечивают большее значение эффективности извлечения в сравнении с другими вариантами при прочих равных условиях.

В третьей главе рассмотрены особенности плазменного эмиттера электронов как сложной нагрузки системы электропитания. Произведены оценки емкостной и индуктивной компонент сопротивления генератора плазмы. Показано, что в стационарном режиме реактивная составляющая практически не оказывает влияния на параметры горения разряда. В импульсном режиме резистивная составляющая, так же как и в стационарном режиме, определяет амплитудное значение тока в установившемся режиме горения разряда. Реактивная составляющая импеданса разрядного промежутка проявляется только на фронтах подаваемого импульса напряжения, т.е. в промежутке времени формирования и гашения разряда. В рассмотренных газоразрядных структурах это время не превышает 10 – 20 мкс. При формировании пусковых импульсов напряжения разряда при работе ПИЭЛ целесообразно ограничиться диапазоном их длительности порядка 20 – 100 мкс. Такая длительность обусловлена десорбцией плазмообразующего газа с электродов разрядной камеры и кратковременным значительным повышением давления в разряде по сравнению с давлением в стационарном режиме. В течение этого времени при формировании разряда его ток может достигать величины на порядок большей, чем в стационарном режиме.



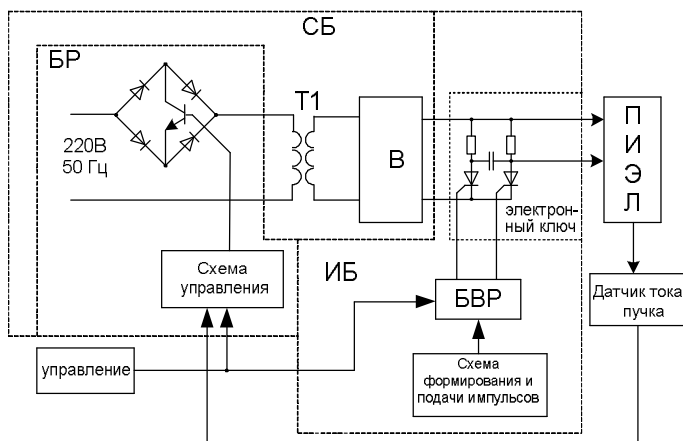
$Q = 100 \text{ атм} \cdot \text{см}^3/\text{ч}; i_d = 0,18 \text{ А};$   
 1 –  $i_e, \alpha$ ; 2, 4, 6 –  $i_{em}$ ; 3, 5, 7 –  $i_a$ ;  
 1 – 3 –  $R_{cm} = 0$ ; 4, 5 –  $R_{cm1} = 500 \text{ Ом}$ ;  
 6, 7 –  $R_{cm2} = 500 \text{ Ом}$

**Рисунок 7 – Зависимость тока эмиссии и токов на электроды от ускоряющего напряжения**

Предложена структурная (рисунок 8) и принципиальные схемы функциональных узлов блока питания разряда, изложены их принципы работы в стационарном и импульсном режимах. Разработанная система электропитания обеспечивает: зажигание разряда в начальный момент и повторное зажигание при его погасании в любой момент технологического цикла; стабилизацию заданного тока разряда или тока пучка, автоматическую и/или ручную регулировку тока разряда по заданному току пучка; регулировку тока пучка

В третьей главе рассмотрены особенности плазменного эмиттера электронов как сложной нагрузки системы электропитания. Произведены оценки емкостной и индуктивной компонент сопротивления генератора плазмы. Показано, что в стационарном режиме реактивная составляющая практически не оказывает влияния на параметры горения разряда. В импульсном режиме резистивная составляющая, так же как и в стационарном режиме, определяет амплитудное значение тока в установившемся режиме горения разряда. Реактивная составляющая импеданса разрядного промежутка проявляется только на фронтах подаваемого импульса напряжения, т.е. в промежутке времени формирования и гашения разряда. В рассмотренных газоразрядных структурах это время не превышает 10 – 20 мкс. При формировании пусковых импульсов напряжения разряда при работе ПИЭЛ целесообразно ограничиться диапазоном их длительности порядка 20 – 100 мкс. Такая длительность обусловлена десорбцией плазмообразующего газа с электродов разрядной камеры и кратковременным значительным повышением давления в разряде по сравнению с давлением в стационарном режиме. В течение этого времени при формировании разряда его ток может достигать величины на порядок большей, чем в стационарном режиме.

по экспоненциальному закону для ввода и вывода кратера, а также позволяет работу плазменного эмиттера в стационарном и импульсном режимах. Предложены схемы построения блоков ускоряющего напряжения и питания



СБ – силовой блок; БР – блок регулировок;  
В – выпрямитель; Т1 – повышающий трансформатор; ИБ – импульсный блок;  
БВР – блок выбора режима

**Рисунок 8 – Структурная схема универсального БПП**

риментального электронно-лучевого энергокомплекса на РУП «МТЗ». Представлены основные характеристики, обеспечиваемые ПИЭЛ с полым катодом и со скрещенными  $E \times H$  полями в разработанном электронно-лучевом энергокомплексе при давлениях ниже  $10^{-1}$  Па. Установлено, что при более высоких давлениях в технологической камере источники не могут обеспечить достаточное ускоряющее напряжение вследствие зажигания разряда в ускоряющем промежутке. Полученные проплавления при давлениях ниже  $10^{-1}$  Па близки к полученным с использованием термокатодных пушек с подобными параметрами. Показана возможность применения разработанного энергокомплекса с пушкой на основе плазменного эмиттера для формирования прерывистых сварочных швов на сложнопрофильных деталях. Особенности ПИЭЛ позволяют реализовать прерывистый режим сварки за счет соответствующей модуляции тока фокусирующей линзы. Разработана система автоматической модуляции тока фокусирующей системы, способная обеспечить прерывистый



**Рисунок 9 – Прерывистый шов (а) и макрошлиф проплавления (б)**

фокусирующих линз, выполненных с учетом особенностей плазменных эмиттеров.

*Четвертая глава* посвящена разработке электронно-лучевых устройств на основе плазменных эмиттеров для электронно-лучевой сварки при повышенном давлении в технологической камере с параметрами, необходимыми для сварки шестерен на РУП «Минский тракторный завод» (МТЗ), для термической модификации внутренних цилиндрических поверхностей, а также технологической апробации разработанного экспериментального электронно-лучевого энергокомплекса на РУП «МТЗ».

режим сварки практически любой сложности. На рисунке 9 приведены фотоснимки прерывистого сварного шва и макрошлифа проплавления для частного случая сварки элементов шестерен на РУП «МТЗ» при мощности пучка 1,8 кВт. Показана возможность



применения энергокомплекса с ПИЭЛ для сварки при давлениях в технологической камере порядка  $5 \cdot 10^{-1}$  Па, т.е. при откачке камеры только форвакуумным насосом, что значительно повышает производительность установки. С учетом особенностей электронного пучка, формируемого ПИЭЛ, разработан газодинамический канал (ГДК), обеспечивающий необходимый перепад давлений между областью ускорения пучка и технологической камерой. Приводится расчет ГДК, разработанного для модернизации электронно-лучевой установки на РУП «МТЗ». На рисунке 10 показаны поперечные макрошлифы швов,

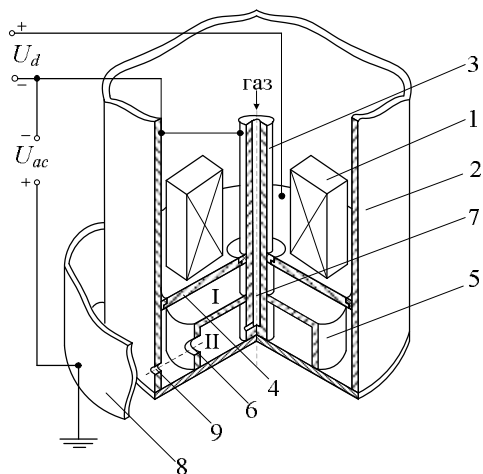


**Рисунок 10 – Макрошлифы швов, полученных без ГДК (а) и при его наличии (б)**

полученные для двух случаев – при давлении  $10^{-1}$  Па без ГДК (рисунок 10, а) и при повышенном до 5 Па давлении с использованием ГДК (рисунок 10, б), при мощности пучка 1,2 кВт. Анализ макрошлифов показал, что, хотя при наличии ГДК характеристики

пучка несколько ухудшаются, разработанная аппаратура пригодна для электронно-лучевой сварки при форвакуумной откачке технологической камеры и способна обеспечить при этом достаточно высокую производитель-

ность технологического процесса.



- 1 – магниты; 2 – внешний катод;
- 3 – внутренний катод; 4 – анод;
- 5 – полый катод; 6 – отверстие в полом катод; 7 – канал для напуска газа;
- 8 – обрабатываемая деталь;
- 9 – эмиссионное отверстие

**Рисунок 11 – Плазменный эмиттер с радиальными пучками**

Приведено описание конструкции и параметров разработанного ПИЭЛ, который позволяет осуществлять термическую обработку внутренних цилиндрических поверхностей деталей. В процессе работы ПИЭЛ (его схема показана на рисунке 11) вводится внутрь обрабатываемых изделий, при этом формируется электронный пучок, перпендикулярный к оси обрабатываемой цилиндрической поверхности. Такой ПИЭЛ при ускоряющих напряжениях порядка  $10^4$  В обеспечивает плотность мощности пучка порядка  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Для обработки цилиндрической поверхности с использованием такого источника требуется вращение и осевое перемещение обрабатываемой цилиндрической поверхности.

Экспериментальные испытания и характеристики этого ПИЭЛ показали возможность его применения для закалки и оплавления микронеровностей

внутренних поверхностей цилиндрических деталей в условиях промышленного производства.

В заключение главы представлены результаты апробации разработанного энергокомплекса, показан экономический эффект от внедрения электронно-лучевой сварки, а также изложены некоторые перспективы применения разработанного энергокомплекса.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработан электронно-лучевой энергокомплекс на основе пушек с плазменным эмиттером, позволяющий получать сфокусированные электронные пучки с плотностью мощности до  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, а также пучки большого сечения диаметром до 50 мм с плотностью мощности до  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Применение сфокусированных электронных пучков возможно в диапазоне давления от  $10^{-2}$  до 1 Па, когда осуществляется вывод электронного пучка через газодинамический канал в область сварки. Указанные характеристики электронных пучков позволяют охватить до 80 % всего объема электронно-лучевых технологий, необходимых для машино- и приборостроения Беларуси [1, 2, 4, 5, 11, 25].

2. На основе анализа характеристик известных плазменных эмиттеров определены два их типа, позволяющие реализовать параметры электронного пучка, близкие к параметрам пучков, формируемых термокатодными электронными пушками для электронно-лучевой сварки, и показана возможность модернизации существующих энергокомплексов с термокатодными пушками их заменой на плазменный эмиттер с целью повышения производительности (на 20 – 30 %) и ресурса (в 2 – 3 раза) энергокомплексов [4, 12, 17 – 19, 22].

3. Установлено, что ток эмиссии формируется в плазменном эмиттере в результате совместного действия двух механизмов: изменения состояния пристеночных слоев в генераторе эмиттирующей плазмы (падения потенциала в слоях) и формирования в плазме электрического поля с напряженностью порядка 100 В/м, приводящего к увеличению степени ионизации плазмообразующего газа. Влияние возникающего в плазме поля на эмиссионные характеристики плазменного эмиттера рассмотрено впервые [3, 8 – 10, 13, 20].

4. Экспериментально и численным моделированием на основе разработанной модели плазменного эмиттера показано, что при увеличении эффективности извлечения электронов из плазмы изменение интенсивности указанных механизмов формирования тока эмиссии приводит к снижению мощности, потребляемой от источника электропитания разряда. Это, во-первых, показывает, что схемотехническая стабилизация (регулируемостью параметров источника электропитания разряда) тока эмиссии не обеспечивает в доста-

точной для технологического применения степени стабильность тока эмиссии (электронного пучка), во-вторых, позволяет впервые установить взаимосвязь между перераспределением энерговклада в разряд от источников электропитания плазменного эмиттера и эффективностью извлечения [9, 10, 26].

5. Показана возможность повышения стабильности тока эмиссии его автоматическим регулированием за счет автосмещения потенциала эмиттерного электрода, при котором произвольное (неконтролируемое) изменение тока эмиссии сопровождается изменениями потенциала эмиттерного электрода и параметров пристеночного слоя в эмиссионном канале, обеспечивающими отрицательную обратную связь по току эмиссии (электронного пучка), что упрощает схемотехническую стабилизацию тока эмиссии и позволяет получить нестабильность тока пучка не хуже 2,5 %. Предложен способ повышения стабильности эмиссионного тока при неустойчивых внешних условиях (давлении газа) за счет особой конфигурации электрического и магнитного полей в области эмиттерного электрода газоразрядной структуры плазменного эмиттера [9, 10].

6. С учетом исследованных принципов стабилизации тока эмиссии разработан блок электропитания плазменного эмиттера, который осуществляет регулирование и стабилизацию тока эмиссии, обеспечивает автоматическую подачу импульса напряжения выше напряжения зажигания при случайных погасаниях разряда и позволяет реализовать непрерывный и импульсный режимы работы плазменного эмиттера, что значительно расширяет спектр возможных электронно-лучевых технологий на базе одного электронно-лучевого энергокомплекса [6, 7, 9, 10, 15, 23, 24, 27].

7. Сконструирован плазменный эмиттер для термической обработки (закалки и оплавления микронеровностей) внутренних цилиндрических металлических поверхностей. Показано, что разработанная газоразрядная структура для формирования радиальных пучков формирует электронные пучки диаметром 2,5 – 3 мм и плотностью мощности до  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> [21, 28].

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

Разработанный энергокомплекс принят в эксплуатацию в цех малых серий РУП «Минский тракторный завод», что свидетельствует о возможности применения разработанного энергокомплекса для реализации электронно-лучевых технологий на промышленных предприятиях Республики Беларусь. Предложенная система автоматического управления параметрами фокусирующей системы и электронного пучка позволяет формировать прерывистые сварные соединения, что может быть использовано для электронно-лучевой обработки сложнопрофильных деталей. Сконструированная газоразрядная структура для формирования радиальных пучков может служить прототипом при создании ПИЭЛ для закалки и оплавления микронеровностей внутренних поверхностей цилиндрических деталей в условиях промышленного производства.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в научных журналах:

1. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166 – 170.
2. Плазменные источники электронов – перспективные устройства для электронно-лучевых технологий / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Мир технологий. – 2003. – № 1. – С. 45 – 54.
3. Антонович, Д.А. Генератор эмиттирующей плазмы как сложная нагрузка систем электропитания плазменных источников электронов / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2004. – № 11. – С. 86 – 90.
4. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Тяжелое машиностроение (Россия). – 2004. – № 9. – С. 25 – 32.
5. Universal plasma electron source / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev // Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399 – 405.
6. Источник питания плазменного эмиттера / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 4. – С. 122 – 127.
7. Блок питания разряда плазменного источника электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Приборы и техника эксперимента (Россия). – 2006. – № 5. – С. 130 – 132.
8. Антонович, Д.А. Влияние давления газа на эмиссионные свойства плазменного эмиттера / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий, Д.Г. Руголь // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2007. – № 4. – С. 122 – 127.
9. Zalesski, V.G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V.G. Zalesski, D.A. Antonovich // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771 – 7777.
10. Антонович, Д.А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2008. – № 9. – С. 114 – 123.

## **Статьи в сборниках научных трудов:**

11. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев, В.Г. Залесский, А.Г. Маняк // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр. / под общ. ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск: Технопринт, Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 369 – 372.

12. Груздев, В.А. Плазма как источник технологических электронных пучков / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Тр. V симпозиума в Беларуси, Сербии и Черногории по физике и диагностике лабораторной и астрофизической плазмы (ФДП-V 2004): Минск, 20 – 23 сентября 2004 г. / под общ. ред. В.С. Буракова и А.Ф. Чернявского. – Минск: Ковчег, 2004 г. – С. 187 – 191.

13. Груздев, В.А. Особенности работы плазменных источников электронов (ПИЭЛ) при повышенных давлениях / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович // Плазменная эмиссионная электроника: тр. II междунар. крейнделевского семинара, Улан-Уде, 17 – 24 июня 2006 г. / под общ. ред. А.П. Семенова. – Улан-Уде: БНЦ СО РАН, 2006. – С. 70 – 78.

14. Антонович, Д.А. Формирование прерывистых электронных пучков в пушках с плазменным эмиттером / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Материалы, технологии и оборудование в производстве, в ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – Т. 3. – С. 92 – 95.

## **Статьи в сборниках материалов научных конференций:**

15. Антонович, Д.А. Особенности импульсного разряда в плазменном источнике электронов с пучком большого сечения / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Материалы V Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь, Гродно. 25 – 27 апр. 2000 г.: в 5 ч. Ч. 5. – Гродно: ГрГУ, 2000. – С. 6 – 11.

16. Антонович, Д.А. Источник питания для иницируемого импульсного сильноточного газового разряда / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Материалы V Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь, Гродно. 25 – 27 апр. 2000 г.: в 5 ч. Ч. 5. – Гродно: ГрГУ, 2000. – С. 74 – 77.

17. Plasma source of charged particles based on superdense pulse glow discharge / V.A. Gruzdev, V.G. Zaleski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev // Proc. III Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, 2000. – Vol. I. – P. 60 – 63.

18. Импульсный плазменный источник электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов: материалы

4-й междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Ч. II / под общ. ред. А.И. Свириденко, А.А. Михалевича. – Гродно: ГрГУ, 2001. – С. 19 – 25.

19. Применение электронных пушек с плазменным эмиттером для сварки и других электронно-лучевых технологий / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Ю.В. Мазаник, Д.Г. Руголь // Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием: материалы заседаний секции 3-й междунар. выставки «Электротехнология-2005», Санкт-Петербург, 25 – 26 мая 2005 г. – СПб.: СПбГТУ, 2005. – С. 51 – 62.

20. Gruzdev, V.A. Gas discharge plasma disturbance by electron extraction / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich // Proc. V Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, September 18 – 22, 2006. – Minsk, 2006. – Vol. I. – P. 154 – 157.

21. Антонович, Д.А. Плазменный эмиттер для формирования радиально расходящихся электронных пучков / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. материалов V междунар. науч.-техн. конф.: в 3-х т. / под. общ. ред. А.П. Достанко, В.А. Груздева. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т. II: Технология. – С. 48 – 51.

### **Тезисы докладов на конференциях:**

22. Импульсный плазменный источник электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Ресурсосберегающие эко-технологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов: тез. докл. IV междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 2000. – С. 54.

23. Антонович, Д.А. Система электропитания газоразрядной структуры плазменного источника электронов с пучком большого сечения / Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Тез. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов Беларуси: в 2-х ч. Ч. I / ред. кол.: Г.И. Михасев [и др.]. – Витебск: Изд-во ВГУ им. П.М. Машерова, 2002. – С. 4 – 6.

24. Залесский, В.Г. Способ управления параметрами газового разряда в плазменном источнике электронов / В.Г. Залесский, Д.А. Антонович // Наука – образованию, производству, экономике: реф. докл. междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х т. Т. I / под ред. Б.М. Хрусталева – Минск: УП «Техно-принт», 2003. – С. 201.

25. The universal plasma electron sources / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev // Proc. 7-th International Conference on Electron Beam Technologies, 1 – 6 June Varna, 2003. – P. 133.

26. Gruzdev, V.A. Energy balance of plasma electron emitter / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich // Proc. Int. Conf. on Plasma Physics and Technology; Prague, 14 – 17 June 2004. – P. 149.

## Патенты:

27. Блок питания разряда: пат. на пол. модель 2539 Респ. Беларусь, МПК 7 Н 01J 37/077, 3/00 / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, И.С Русецкий; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20050410; заявл. 05.06.2005; опубл. 10.09.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3 (52). – С. 541.

28. Источник электронов с плазменным эмиттером для получения радиального пучка: пат. на пол. модель 4995 Респ. Беларусь, МПК 7 Н 01J 37/077, 3/00 / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20080551; заявл. 07.07.2008; опубл. 28.02.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1 (66). – С. 209.

## РЭЗЮМЭ

**Антановіч Дзмітрый Анатольевіч**

### **Тэхналагічны электронна-прамянёвы энергакомплекс на аснове пушкі з плазмавым эмітарам**

**Ключавыя словы:** электронна-прамянёвыя тэхналогіі, плазмавыя крыніцы электронаў, электронна-прамянёвы энергакомплекс, эмісія электронаў, плазмавы эмітар, газавы разрад.

**Аб’ект даследавання** – электродныя структуры, у якіх узбуджаецца газавы разрад, плазма газавага разраду, электронны пучок, сістэмы электрасілкавання плазмавых крыніц электронаў.

**Прадмет даследавання** – узаемасувязь характарыстак разрадаў, эмісійных уласцівасцяў плазмы, умоў пераключэння электронаў з газаразраднай плазмы ў электронны пучок, спосабы кіравання параметрамі пучка.

**Мэта даследаванняў** – стварэнне універсальнага энерга- і рэсурсазберагальнага айчыннага тэхналагічнага электронна-прамянёвага энергакомплексу на аснове электроннай пушкі з плазмавым эмітарам са стабільнымі эмісійнымі характарыстыкамі для электронна-прамянёвай апрацоўкі матэрыялаў.

**Метады даследаванняў:** фізіка-матэматычнае мадэляванне і эксперыментальныя даследаванні.

Распрацаваны электронна-прамянёвы энергакомплекс на аснове пушак з плазмавым эмітарам, які дазваляе атрымліваць сфакусаваныя (зварачныя) электронныя пучкі з шчыльнасцю магутнасці да  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, а таксама пучкі вялікага сячэння з шчыльнасцю магутнасці да  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, фармаванне якіх магчыма пры цісках ад  $10^{-2}$  да  $10^0$  Па. Распрацавана фізіка-матэматычная мадэль плазмавага эмітара, якая ўлічвае ўзбурэнне плазмы газавага разраду, абумоўленае адборам з яе электронаў. Усталявана, што размеркаванне электронаў

троннага току з плазмы паміж электродамі газаразраднай структуры і эмісійным каналам у істотнай ступені вызначаецца двума механізмамі: зменай падзення патэнцыялу ў прысцэначных пластах, якія абмяжоўваюць эмітуючую плазму; з'яўленнем электрычнага поля ў плазме, якое выклікае дрэйф плазмавых электронаў і дадатковую іянізацыю ім газу, а не толькі суадносінамі плошчаў электродаў газаразраднай структуры і эмісійнага канала, як было прынята лічыць раней. Прапанаваны механізм дадатковага энергаўкладу ў разрад, які фарміруе плазму ў плазмавай крыніцы электронаў, ад крыніцы напружання паскарэння электроннага пучка. Распрацаваны спосабы кіравання эфектыўнасцю вымання (эмісійным токам). Распрацавана арыгінальная сістэма электрасілкавання плазмавага эмітара, якая ажыццяўляе рэгуляванне і стабілізацыю току эмісіі, аўтаматычную падачу імпульсу напружання вышэй напружання запальвання пры выпадковых згасаннях разраду і забяспечвае працу плазмавага эмітара ў стацыянарным і імпульсным рэжымах. Сканструяваны плазмавы эмітар, які фарміруе радыяльныя электронныя пучкі дыяметрам да 3 мм і шчыльнасцю магутнасці да  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, для тэрмічнай мадыфікацыі ўнутраных цыліндрычных металічных паверхняў. Вынікі даследавання ўкаранены на РУП «Мінскі трактарны завод».

## РЕЗЮМЕ

**Антонович Дмитрий Анатольевич**

### **Технологический электронно-лучевой энергокомплекс на основе пушки с плазменным эмиттером**

**Ключевые слова:** электронно-лучевые технологии, плазменные источники электронов, электронно-лучевой энергокомплекс, эмиссия электронов, плазменный эмиттер, газовый разряд.

**Объект исследования** – электродные структуры, в которых возбуждается газовый разряд, плазма газового разряда, электронный пучок, системы электропитания плазменных источников электронов. Предмет исследования – взаимосвязь характеристик разрядов, эмиссионных свойств плазмы, условий переключения электронов из газоразрядной плазмы в электронный пучок, способы управления параметрами пучка.

**Цель исследований** – создание универсального энерго- и ресурсосберегающего отечественного технологического электронно-лучевого энергокомплекса на основе электронных пушек с плазменным эмиттером со стабильными эмиссионными характеристиками для электронно-лучевой обработки материалов.

**Методы исследований:** физико-математическое моделирование и экспериментальные исследования.



Разработан электронно-лучевой энергокомплекс на основе пушек с плазменным эмиттером, позволяющий получать сфокусированные (сварочные) электронные пучки с плотностью мощности до  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, а также пучки большого сечения с плотностью мощности до  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>, формирование которых возможно при давлениях от  $10^{-2}$  до  $10^0$  Па. Разработана физико-математическая модель плазменного эмиттера, учитывающая возмущение эмиттирующей плазмы газового разряда, обусловленное отбором из нее электронов. Установлено, что распределение электронного тока из плазмы между электродами газоразрядной структуры и эмиссионным каналом в существенной степени определяется двумя механизмами: изменением падения потенциала в пристеночных слоях, ограничивающих эмиттирующую плазму; появлением электрического поля в плазме, вызывающего дрейф плазменных электронов и дополнительную ионизацию им газа, а не только соотношением площадей электродов газоразрядной структуры и эмиссионного канала, как было принято считать ранее. Предложен механизм дополнительного энерговклада в разряд, формирующий эмиттирующую плазму в ПИЭЛ, от источника напряжения ускорения электронного пучка. Разработаны способы управления эффективностью извлечения (эмиссионным током). Разработана оригинальная система электропитания плазменного эмиттера, осуществляющая регулирование и стабилизацию тока эмиссии, автоматическую подачу импульса напряжения выше напряжения зажигания при случайных погасаниях разряда и обеспечивающая работу плазменного эмиттера в стационарном и импульсном режимах. Сконструирован плазменный эмиттер, формирующий радиальные электронные пучки диаметром до 3 мм и плотностью мощности до  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> для термической модификации внутренних цилиндрических металлических поверхностей. Результаты исследования внедрены на РУП «Минский тракторный завод».

## SUMMARY

**Antonovich Dmitry Anatolevich**

### **Technological electron-beam energocomplex based on a gun with a plasma emitter**

**Keywords:** electron-beam technologies, plasma electron sources, electron beam energocomplex, electron emission, plasma emitter, gas discharge.

**Object of research** – electrode structures in which the gas discharge is raised, gas-discharge plasma, an electron beam, power supplies of plasma electron sources. **Subject of research** – interrelation of discharge characteristics, plasma emission properties, conditions of electron switching from gas-discharge plasma in an electron beam, ways of beam parameters management.

**The aim of research** – creation of a universal energy and resource saving domestic technological electron beam energocomplex based on a gun with a plasma emitter with stable emission characteristics for materials electron beam processing.

**Methods of research:** physical and mathematical modelling and experimental research.

An electron beam energocomplex based on guns with a plasma emitter is developed. This energocomplex allows to receive focused (welding) electron beams with capacity density  $10^9$  W/m<sup>2</sup> and also large cross section beams with capacity density  $10^8$  W/m<sup>2</sup>. Formation of such beams is possible at pressure from  $10^{-2}$  to  $10^0$  Pa. The physical and mathematical model of the plasma emitter considering disturbance of emitting plasma of the gas discharge, caused by electron selection from it is developed. It is established, that distribution of an electron current from plasma between electrodes of gas-discharge structure and the emission channel in essential degree is determined by two mechanisms: change of potential drop in nearwall layers limiting emitting plasma; electric field occurrence in the plasma, causing drift of plasma electrons and additional ionisation of gas by it, and not just a parity of the areas of electrodes of gas-discharge structure and the emission channel as it was considered to be earlier. The mechanism of additional energoinput into the discharge forming emitting plasma in a plasma electron source, from an acceleration power supply unit is offered. Ways of extraction efficiency (an emission current) management are developed. The original plasma emitter power supply system, carrying out emission current regulation and stabilisation, automatic giving of voltage impulse above ignition voltage is at casual discharge disappearance and ensuring functioning of the plasma emitter in stationary and pulse modes is developed. The plasma emitter forming radial electron beams with diameter up to 3 mm and capacity density to  $10^8$  W/m<sup>2</sup> for thermal influence on internal cylindrical metal surfaces is developed. Results of research are introduced at Minsk tractor factory.



Дмитрий Анатольевич АНТОНОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКС  
НА ОСНОВЕ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Подписано в печать 26.06.09. Формат 60×84. Бумага офсетная.

Ризография. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,05. Тираж 60 экз. Заказ 1283.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образование «Полоцкий государственный университет»

Лицензия ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.09 г.

Лицензия ЛП № 02330/0494256 от 19.05.09 г.

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29