

На правах рукописи



КОЖЕЧЕНКО АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный Щербаков Алексей Владимирович

руководитель: доктор технических наук, профессор кафедры ЭППЭ
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные Беленький Владимир Яковлевич

оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры
«Сварочное производство, метрология и технология
материалов» ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»

Агафонов Роман Юрьевич

кандидат технических наук, начальник группы отдела
материаловедения акционерного общества «Российские
космические системы»

Ведущая Федеральное государственное бюджетное
организация: образовательное учреждение высшего образования
"Московский государственный технологический
университет "СТАНКИН"

Защита диссертации состоится «10» июня 2021 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.003 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, корпус А, ауд. А-206.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».
Автореферат разослан 5 мая 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
МЭИ.003 к.т.н., доц.



Кулешов А.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Электронный луч позволяет осуществлять процессы сварки, резки, перфорации, наплавки, напыления, плавки, модифицирования поверхностей, а также процессы аддитивного формообразования. Электронно-лучевая технология (ЭЛТ) характеризуется высокой концентрацией энергии в зоне воздействия луча (от 10^3 до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²), высоким отношением глубины проплавления к ширине при сварке (более 10:1 при «кинжальном» проплавлении), возможностью полной автоматизации процесса при гибком управлении, а также позволяет обеспечить чистоту сварного шва за счет проведения процесса в вакууме. ЭЛТ обеспечивает эффективную обработку химически активных, разнородных и тугоплавких материалов. Технология особенно актуальна для прецизионной сварки тонколистовых изделий, микросварки, герметизации корпусов. Зачастую, ЭЛТ применяется на наиболее ответственных участках производства. При этом точность поддержания теплового режима и его воспроизводимость является основным условием высокого качества изготавливаемой детали.

Несмотря на значительные успехи в развитии технологических процессов и самого оборудования для электронно-лучевой обработки, вопрос обеспечения повторяемости режимов обработки по-прежнему остаётся актуальным и не решенным. При обработке типовых изделий отклонение характеристик электронно-лучевой обработки (глубина или ширина сварного шва, размеров зоны термического влияния и т.д.) от требуемых значений происходит в основном из-за действия неконтролируемых факторов на сам электронный пучок. Например, изменение характеристик распределения плотности тока в области воздействия пучка на изделие может быть связано с отклонением температуры или эмиссионных свойств катода, незначительным смещением электродов пушки друг относительно друга, действием остаточных магнитных полей или накопленных зарядов в области генерации и прохождения пучка, изменением парциальных давлений остаточных газов и паров обрабатываемых

материалов. Контроль всех упомянутых факторов невозможен из-за их большого числа и, порой, обоюдного влияния на характеристики пучка. Поэтому наиболее эффективным методом обеспечения воспроизводимости результатов технологического процесса является контроль характеристик самого пучка, а не влияющих на него факторов.

В этой связи актуальной задачей является разработка автоматизированных и экспресс-методов контроля пространственных распределений плотности тока мощных электронных пучков, применяемых в упомянутых технологиях. Существующие сегодня методы прямого измерения распределений плотности тока, при реализации которых производится непосредственное измерение составляющих тока пучка, поглощаемых датчиками, имеют ограничения по предельной мощности электронного пучка (1-1,2 кВт) из-за термического разрушения датчиков. Косвенные методы, основанные на регистрации вторичных излучений, электромагнитных полей или потоков заряженных частиц, не обеспечивают требуемую точность измерений (особенно в плоскости наилучшей фокусировки) из-за нелинейных связей измеряемых величин с плотностью тока электронного пучка соотношений размеров пучка и датчика (при малых поперечных размерах пучка). Большая часть описанных косвенных методов измерения основываются на использовании интегральных характеристик пучка (проекций распределения интенсивности излучения на какую-либо плоскость), и требуют априорного предположения об осевой симметрии пучка.

Поскольку в реальных условиях электронный пучок может не обладать осевой симметрией, можно заключить, что для ЭЛТ существует необходимость разработки прямого метода измерения распределений плотности тока, пригодного для мониторинга пучков мощностью более 1..1,2 кВт, имеющих отклонения от осевой симметрии, а также, экспресс-методов контроля геометрических параметров пучков бóльшей мощности, интегрируемых в систему управления электронно-лучевых установок.

Цель диссертационной работы - создание автоматизированной методики мониторинга пространственно-энергетических характеристик технологических электронных пучков, позволяющей осуществлять как экспресс-диагностику мощных пучков непосредственно перед осуществлением технологического процесса, так и точное измерение распределений плотности тока в случае необходимости идентификации отклонений от традиционно принимаемых законов распределения или осевой симметрии для гарантированной воспроизводимости режимов сварки и обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ процесса формирования электронного пучка с учетом действия объемного заряда и других возмущающих факторов, электронного пучка как объекта управления, выделить управляющие и возмущающие воздействия, а также связи пространственно-энергетических характеристик пучка с режимами сварки.

2. Разработать методику измерения пространственно-энергетических характеристик мощных (до 5 - 6 кВт) электронных пучков и определить конструктивные параметры датчиков и параметры систем сбора данных.

3. Создать математическую модель формирования и транспортировки электронного пучка и его взаимодействия с коллектором (материалом датчика).

4. Обеспечить совместную работу аппаратного решения (система измерения) и оригинальной математической модели с возможностью восстановления трехмерного пространственного распределения плотности тока электронного пучка.

5. С помощью созданной методики провести исследования, получить пространственные распределения плотности мощности и проанализировать их, верифицировать разработанную модель. При необходимости внести коррективы в конструкцию датчика.

6. Проработать применение датчика в реальных условиях, дать рекомендации по осуществлению трансфера технологии между разными ЭЛУ и

показать возможность применения стенда для повышения качества обработки материалов.

Методы исследования

При решении поставленных в диссертационной работе задач использованы: положения теории автоматического управления, теоретических основ электротехники, методы математического моделирования, теории теплопередачи. При проведении расчетов использовались программные пакеты структурного имитационного моделирования. Экспериментальные исследования проводились на действующем технологическом оборудовании. Для регистрации данных использовались поверенные средства измерений. Разработано программное обеспечение для снятия и обработки данных.

Обоснованность и достоверность научных результатов подтверждается корректностью принимаемых допущений, обоснованностью принятых методов исследований и совпадением теоретических и экспериментальных данных, полученных на действующих установках.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен метод измерения пространственных распределений плотности тока мощных технологических электронных пучков, в том числе, не обладающих осевой симметрией; теоретически обосновано и экспериментально подтверждено соответствие регистрируемых при реализации метода зондовых характеристик и пространственных распределений плотности тока электронного пучка.

2. С помощью предложенного метода измерения установлен факт смещения главных плоскостей траекторий электронов, оставляющих пучок, относительно друг друга, приводящий к отклонению радиального распределения плотности тока от традиционно принимаемого распределения Гаусса, а также формированию областей с пониженной плотностью тока в центральной части пучка; этот факт согласуется с теоретическими аспектами формирования мощных пучков в условиях действия объемного заряда и других факторов, приводящих к электронно-оптическим aberrациям.

3. Предложена математическая модель взаимодействия сходящегося электронного пучка с многоапертурными коллекторами, пригодная как для анализа соответствия регистрируемых сигналов и распределений плотности тока исходного модельного пучка, так и для создания новых зондовых систем диагностики потоков заряженных частиц.

4. Предложены алгоритмы восстановления радиальных распределений плотности тока мощных электронных пучков по регистрируемым зондовым характеристикам, пригодные при принятом допущении об осевой симметрии пучка, необходимые для решения задач экспресс-диагностики мощных электронных пучков.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. На базе экспериментального датчика и средств компьютерного моделирования разработана оригинальная методика мониторинга характеристик электронных пучков мощностью до 6 кВт.

2. Предложены методика и рекомендации, позволяющие определять конструктивные параметры датчиков, систем измерения электрических сигналов и исполнительных приводов, интегрируемых в систему управления установкой.

3. Разработан исследовательский комплекс на базе электронно-лучевой технологической установки с применением компьютеризированной системы управления и мониторинга, позволяющий по нескольким двумерным распределениям плотности тока электронного пучка получать единую трехмерную модель электронного пучка.

4. Обоснована целесообразность применения оптических развязок по каналам обмена аналоговыми сигналами, обеспечивающих помехозащищенность системы в условиях использования разнородного электрооборудования, подключенного к различным электрическим источникам питания, а также применения зондовых методов исследования характеристик пучков и плазменных процессов; разработаны соответствующие схемотехнические решения.

Практической значимостью обладают предложенные в работе методики по «воссозданию» электронного луча в зонах, где измерить его прямыми методами нельзя из-за высокой плотности мощности (10^6 Вт/см² и выше). Эти методики позволяют обеспечить качество и повторяемость технологического процесса, а значит сократить временные и финансовые затраты на перенос и отладку таких процессов.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Девятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, Москва 2013), на XI Международной конференции по электронно-лучевым технологиям, ЕВТ-2014, (IE BAS, Варна, Болгария, 2014), на III международной научно-практической конференции «Инновационное развитие автоматизации, информационных и энергосберегающих технологий, металлургии и металловедения. Современное состояние, проблематика и перспективы» (НИТУ «МИСиС», Москва, 2015), на XIII международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и Ресурсосбережение XXI век» (Орёл, 2015), на Международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (Москва, 2015), на XVI и XVII Международных конференциях «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Алушта, Крым, 2014, 2016), на XIX Бенардосовских чтениях (ИГЭУ, Иваново, 2017), и на Фёдоровских чтениях 2018 - XLVIII Международной научно-практической конференции с элементами научной школы (МЭИ, Москва, 2018).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 14 печатных работах, в том числе 6 работ считаются входящими в перечень, рекомендованный ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук согласно положению о присуждении ученых степеней

в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», из них два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 65 наименований, 2 приложения, содержит 130 страниц основного текста и 52 иллюстрации.

Содержание работы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована научная новизна и практическая значимость, дается общая характеристика работы.

Первая глава посвящена анализу современного состояния и уровня развития систем мониторинга процесса электронно-лучевой обработки материалов. Приведены особенности формирования технологических электронных пучков и их взаимодействия с обрабатываемым материалом. В главе представлены основные пути совершенствования электронно-лучевых технологий и пути совершенствования электронно-лучевого оборудования. Анализ процессов электронно-лучевой обработки показал, что для реализации технологических процессов сварки и наплавки применяются мощные непрерывно действующие пучки (0,1...100 кВт для процессов сварки и 0,5...3 кВт для процессов наплавки (при аддитивном формообразовании) с плотностью мощности 10^4 - 10^7 Вт/см²). Проведена классификация существующих методов измерения плотности электронных пучков (рис. 1) и анализ возможностей их применения в электронно-лучевых технологических комплексах.

Практически все существующие методы имеют ограничения по мощности диагностируемых пучков, либо не позволяют получить непосредственно распределение плотности тока с требуемой для процесса точностью (косвенные методы), а также могут оказывать воздействие на сам диагностируемый пучок.

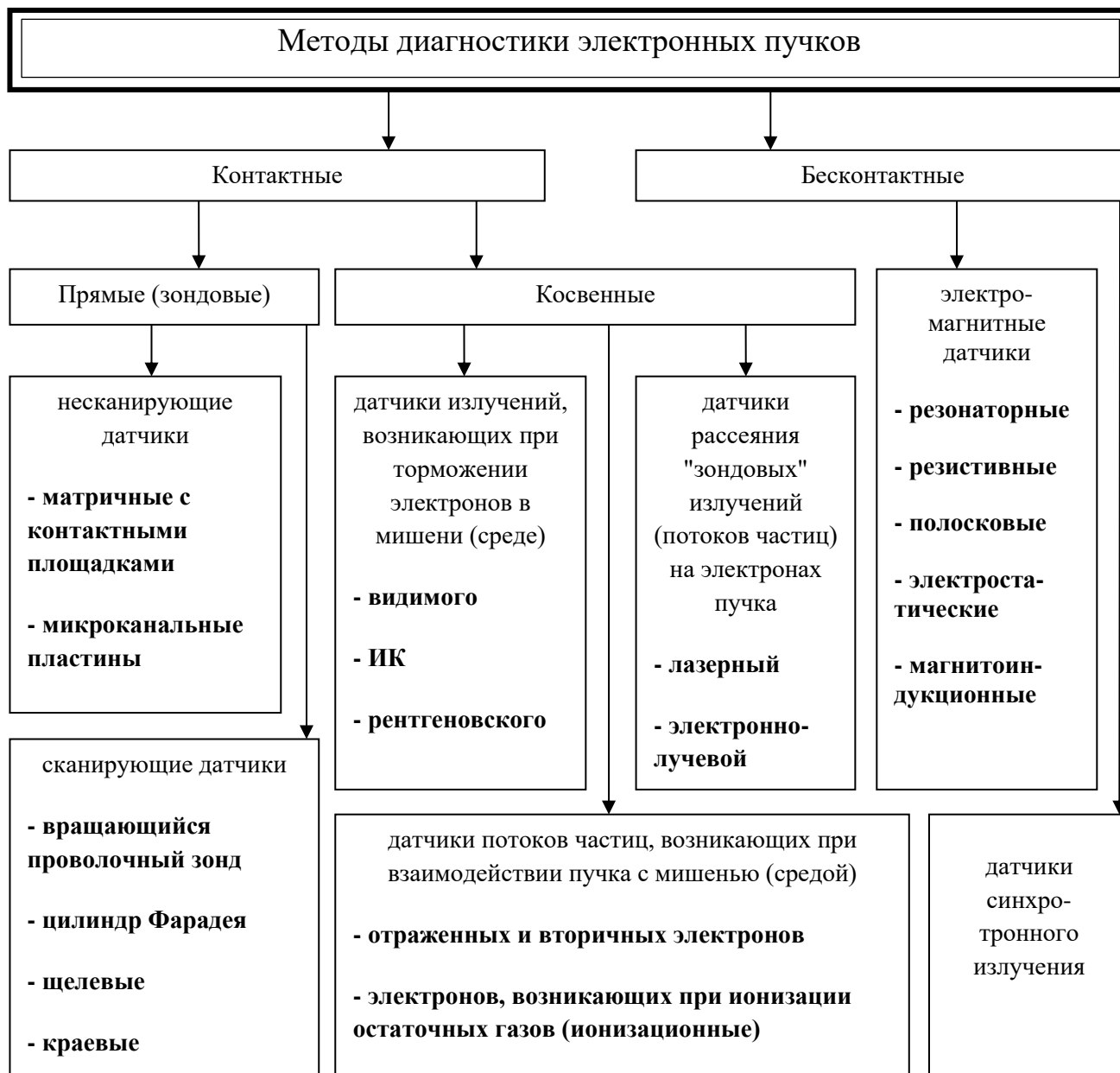


Рис. 1 – классификация методов диагностики электронных пучков

Показана актуальность решения задачи переноса технологических режимов с одной установки на другую для обеспечения воспроизводимости результатов технологических процессов. В результате анализа современного состояния и уровня развития техники в рассматриваемой области были сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке модели формирования и транспортировки электронного пучка и его взаимодействия с коллектором. Для достижения поставленных целей во второй главе была

рассмотрена система «источник питания – электронная пушка» как объект управления, были рассмотрены управляющие и возмущающие воздействия. Для разработки методики исследования формирования пучков с учетом всех влияющих факторов было решено построить комплекс математических моделей, которые будут применяться для обработки данных при мониторинге параметров технологических электронных пучков. Была разработана математическая модель, использующая оригинальный подход - одновременный расчет траекторий всех частиц, участвующих в формировании пучка. Такой подход позволит уйти от итерационных методик, далеко не всегда дающих устойчивое решение. Предложена методика моделирования процессов рассеяния электронного пучка и его взаимодействия с элементами датчика, основанная на методе Монте-Карло и приближении непрерывных потерь для моделирования траекторий электронов в материале коллектора. Показано, что основными характеристиками пучка в заанодном пространстве, которые необходимо анализировать для определения технологических характеристик пушки, являются радиальные распределения плотности тока и апертурных углов частиц.

В третьей главе описан процесс разработки конструкции датчика и методики измерения. Предложена вариация зондового метода для измерения пространственного распределения плотности тока электронного пучка, основанная на использовании разнесенных в пространстве перемещающихся щелевых диафрагм (рис. 2) и показана его актуальность для выявления отклонений распределений плотности тока пучка от осевой симметрии. Установлены ограничения метода, обусловленные термической стойкостью экрана датчика и длительным временем сканирования, составляющим не менее 15 – 20 с при использовании стандартных технологических систем перемещения.

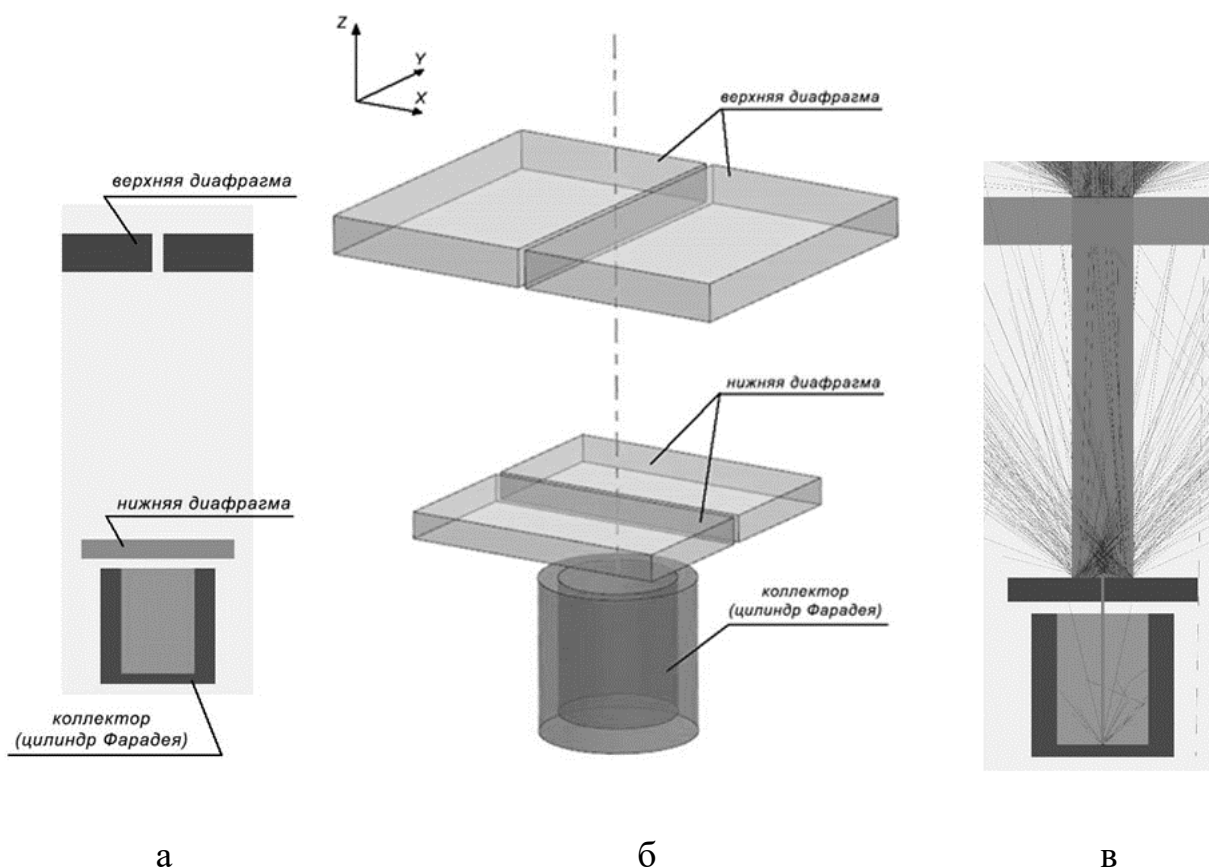


Рис. 2 – взаимное расположение элементов датчика (а, б), результат расчета траекторий электронов пучка при взаимодействии с датчиком (в)

Предложена экспресс-методика измерения радиального распределения плотности тока $J(r)$ по сечению электронных пучков, основанная на методе прямого края и вычислительной обработке временных зависимостей тока (кривых набегания) (рис. 3). Показана целесообразность применения численного метода восстановления функции распределения плотности тока пучков заряженных частиц по экспериментально полученной кривой зависимости тока коллектора от его координаты. Предложенный метод позволяет восстанавливать искомое распределение независимо от характера функции при допущении ее осевой симметрии.

Приведены предварительные размеры детектора для построения геометрической модели. Проведено сравнение аналитического расчета с расчетами, использующими метод Монте-Карло для 10000 траекторий, показавшее, что можно пренебречь влиянием частиц, которые переотражаются от диафрагм детектора. Из результатов сравнения видно, что средняя доля

поглощаемой коллектором энергии составляет 0,0136 от общей энергии электронного пучка (1,36%), что близко к результатам, рассчитанным без учета отражения и переотражения электронов (1,2%). Так как в обоих случаях использовались численные методы, можно утверждать, что расхождение в 0,16% обусловлено именно их применением.

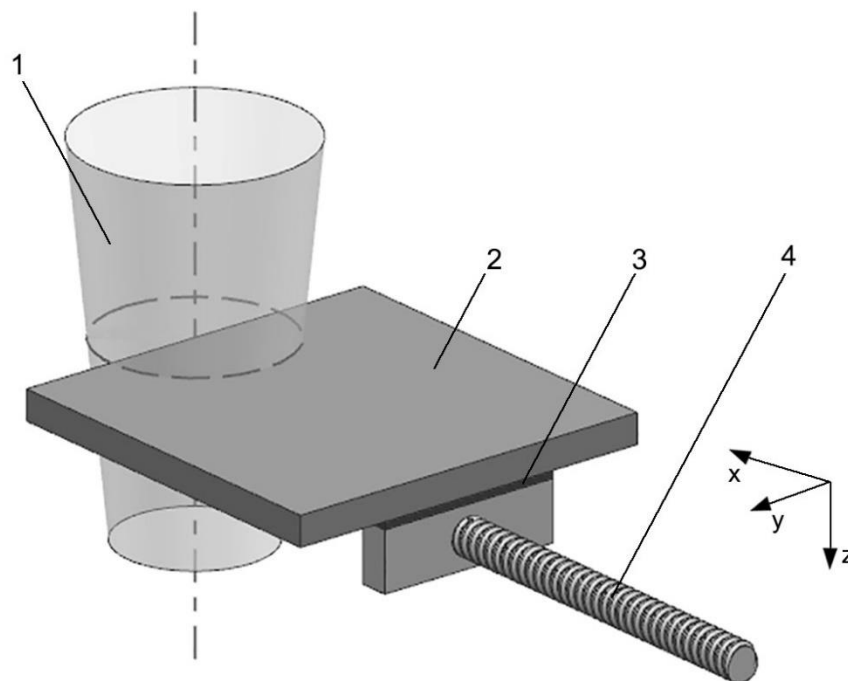


Рис. 3 – коллектор для измерения распределения плотности тока электронного пучка по экспресс-методике, основанная на методе прямого края: 1 —электронный пучок; 2 — коллектор (медная или вольфрамовая пластина); 3 — изолятор (стекло); 4 – элемент системы перемещения датчика

В четвертой главе описано создание экспериментального стенда и проведение серии экспериментальных измерений распределения плотности тока технологических электронных пучков.

Приведенный анализ результатов измерения пространственных распределений электронного пучка с энергией 60 кэВ, током 35 мА и плотностью тока $0,15 \text{ А/мм}^2$, подтверждает работоспособность созданной методики и ее пригодность для исследования мощных пучков заряженных частиц. Эксперименты также показали, что за счет повышения скорости перемещения

диафрагм возможно применение методики для исследования более мощных пучков.

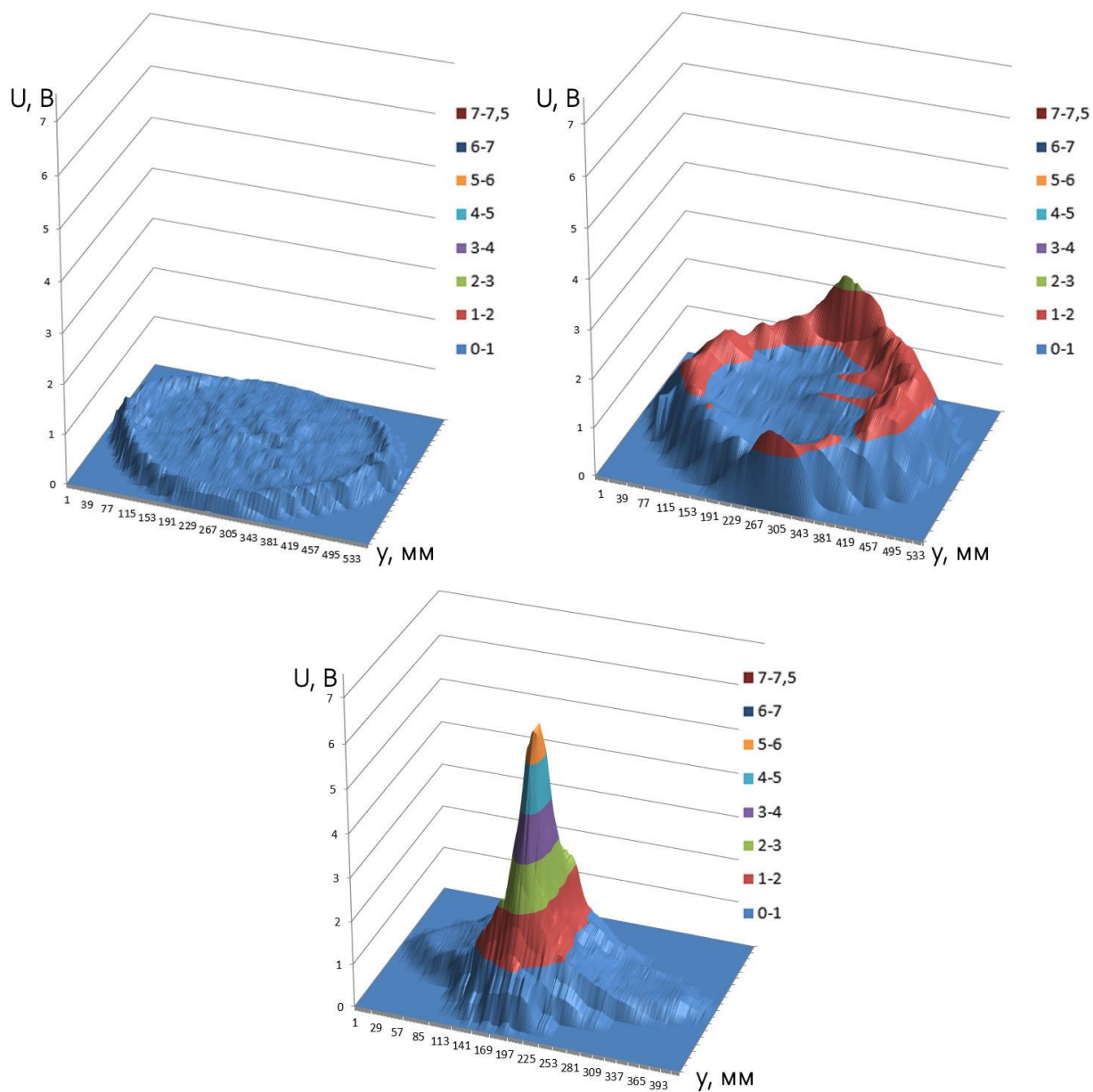


Рис. 4 – экспериментальные зависимости напряжения на коллекторе от линейной координаты щели второй диафрагмы, отсчитываемой от центра пучка при различных положениях первой диафрагмы

Предложена вариация зондового метода для измерения пространственного распределения плотности тока электронного пучка и показана его актуальность для выявления отклонений пучка от осевой симметрии (рис. 4).

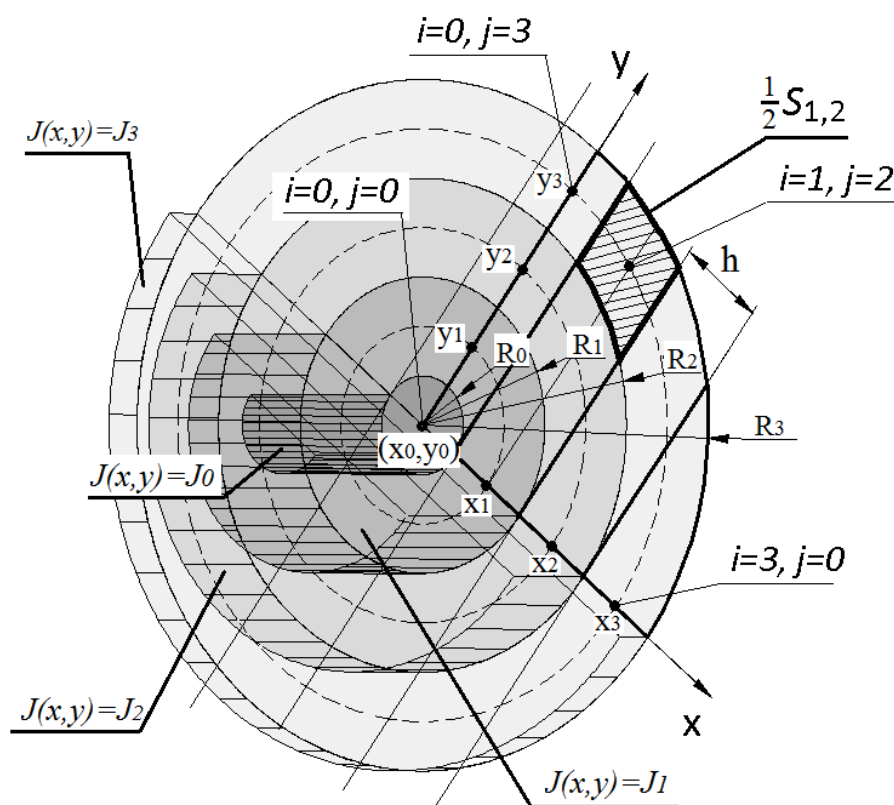


Рис. 5 - схема дискретизации радиального распределения плотности тока электронного пучка

Экспериментально обоснована возможность применения экспресс-методики, основанной на методе прямого края и вычислительной обработке временных зависимостей тока (рис. 5), для измерения характеристик пучков мощностью до 6 кВт с плотностью мощности до $1,8 \cdot 10^4$ Вт/см² при использовании коллектора из меди толщиной 6 мм. Показано, что методика необходима для математического восстановления объемного распределения плотности тока с использованием основных положений электронной оптики.

Разработана методика восстановления пространственного распределения плотности тока электронного пучка по всей его протяженности (рис. 6), в том числе и в сфокусированной части, где плотность тока может превышать 10^2 А/см². Показана возможность восстановления фазовой диаграммы пучка по как минимум двум восстановленным из экспериментально снятых кривых набегания распределениям $J(r)$. Показано, что во всем исследованном диапазоне токов пучка (до 100 мА) при ускоряющем напряжении 60 кВ задача восстановления

распределения плотности тока может быть сведена к чисто геометрической и не требует учета действия собственного заряда пучка.

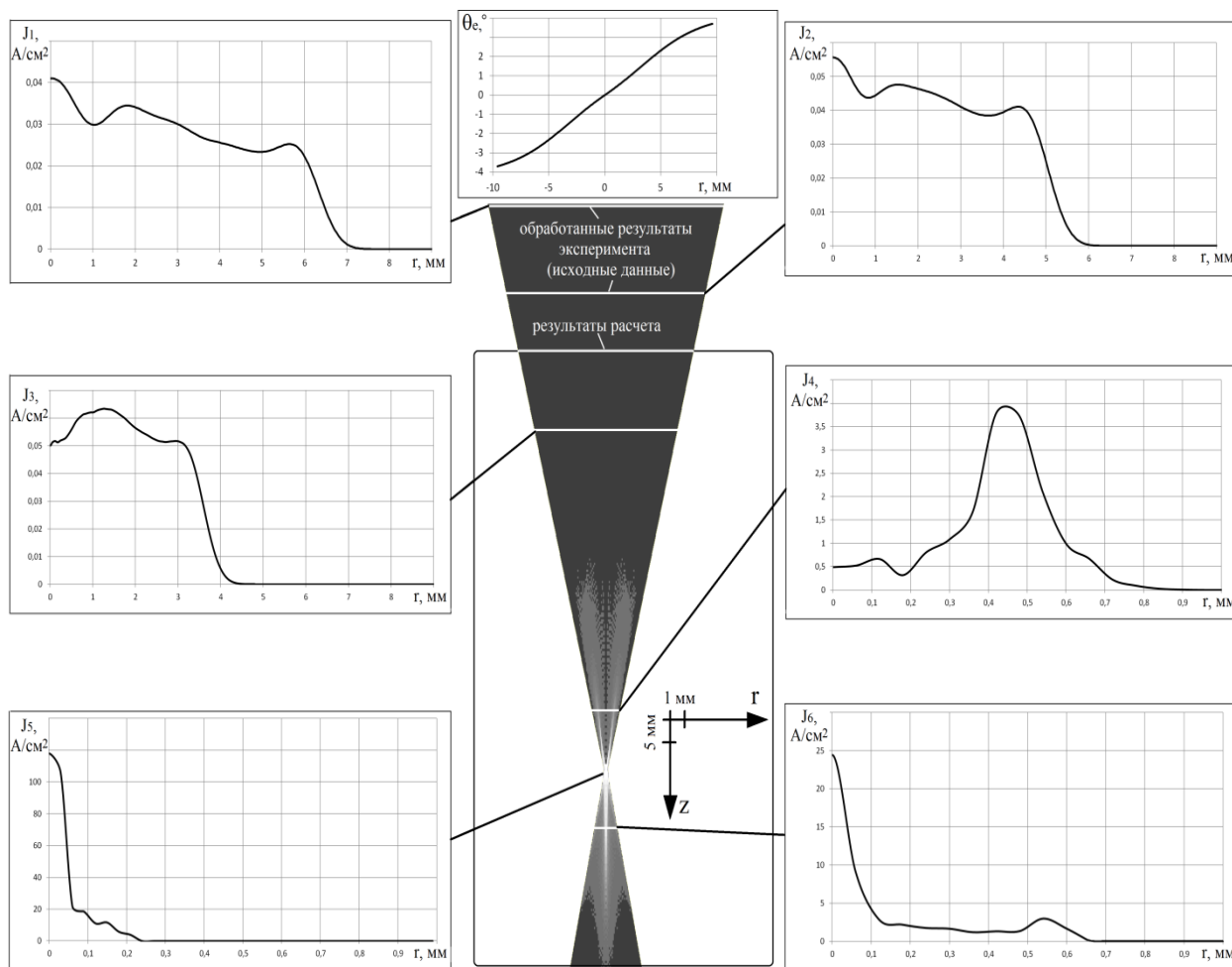


Рис. 6 - восстановленное пространственное распределение плотности тока электронного пучка мощностью 2,1 кВт

В **заклучении** обобщены основные результаты и выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена комплексная методика автоматизированного измерения распределений плотности тока технологических электронных пучков, позволяющая проводить экспресс-мониторинг пространственно-энергетических характеристик пучков мощностью до 6 кВт, и точное измерение двумерных распределений плотности тока для пучков, имеющих отклонения от осевой симметрии; показана актуальность применения методики для обеспечения воспроизводимости технологических процессов при "переносе" технологии с одной установки на другую.

2. На основе анализа электронного пучка как объекта управления выделены управляющие и возмущающие воздействия, влияющие на основные характеристики электронного пучка. Показана целесообразность применения комплекса математических моделей для описания процесса генерации электронного пучка, а также отражения и переотражения электронов при взаимодействии с датчиком. Программная реализация защищена свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Разработана оригинальная математическая модель, основанная на одновременном расчете траекторий всех частиц, участвующих в формировании пучка. Показано, что такой подход позволит уйти от итерационных методик, далеко не всегда дающих устойчивое решение.

4. На основе анализа результатов измерения пространственных распределений электронного пучка с энергией 60 кэВ, током 35 мА и плотностью тока $0,15 \text{ А/мм}^2$, подтверждена работоспособность созданной методики и ее пригодность для исследования мощных пучков заряженных частиц. После проведения ряда экспериментов показана перспективная возможность для исследования более мощных пучков

5. Показано, что основными характеристиками пучка в заанодном пространстве, которые необходимо анализировать для определения технологических характеристик пушки, являются радиальные распределения плотности тока и апертурных углов частиц. Предложена вариация зондового метода для измерения пространственного распределения плотности тока электронного пучка и показана его актуальность для выявления отклонений пучка от осевой симметрии. Установлены ограничения метода, обусловленные термической стойкостью медного экрана датчика и длительностью времени сканирования.

6. Предложена экспресс-методика измерения радиального распределения плотности тока $J(r)$ по сечению электронных пучков, основанная на методе прямого края и вычислительной обработке временных зависимостей тока (кривых набегания). Экспериментально обоснована возможность применения

методики для измерения характеристик пучков мощностью до 6 кВт с плотностью мощности до $1,8 \cdot 10^4$ Вт/см² при использовании коллектора из меди толщиной 6 мм. Показано, что методика необходима для математического восстановления объемного распределения плотности тока с использованием основных положений электронной оптики.

7. Разработана методика по «воссозданию» электронного луча по всей его протяженности, в том числе и в зонах, где измерить его прямыми методами нельзя из-за высокой плотности мощности (10^6 Вт/см² и выше). Показана возможность восстановления фазовой диаграммы пучка по как минимум двум восстановленным из экспериментально снятых кривых набегания распределениям $J(r)$. Показано, что во всем исследованном диапазоне токов пучка (до 100 мА) при ускоряющем напряжении 60 кВ задача восстановления распределения плотности тока может быть сведена к чисто геометрической и не требует учета действия собственного заряда пучка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кожеченко А.С., Щербаков А.В., Родякина Р.В., Гапонова Д.А. Методика автоматизированного измерения пространственных распределений плотности тока технологических электронных пучков // Вестник МЭИ. 2018. №2. С. 72-79.

2. A. V. Shcherbakov, R. V. Rodyakina, A. S. Kozhechenko, D. A. Gaponova, A. L. Goncharov, and V. K. Dragunov An Experimental Study of Current-Density Distributions of a Technological Electron Beam // Technical Physics Letters, 2017, Vol. 43, No. 11, pp. 958–960, <https://doi.org/10.1134/S1063785017110104>

3. Shcherbakov, A.V., Goncharov, A.L., Kozhechenko A.S., Pogrebisskii M. Ya., Rubtsov, V.P., Dragunov, V.K. An express method of measurements of parameters of technological electron beams // Russian Electrical Engineering, August 2016, Volume 87, Issue 8, pp. 487-492, <https://doi.org/10.3103/S1068371216080071>

4. **Shcherbakov, A.V., Rubtsov, V.P., Kozhechenko A.S., Ivashchenko, M.V. Development of standardized circuit solutions for control and data acquisition systems of a research complex on the basis of electron-beam technological installations // Russian Electrical Engineering, Volume 87, Issue 6, 1 June 2016, pp.340-346, <https://doi.org/10.3103/S1068371216060079>**

5. Кожеченко А.С., Щербаков А.В. Пути совершенствования методов измерения пространственных характеристик технологических электронных пучков // Научное электронное издание “Фёдоровские чтения — 2018 XLVIII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы”, Москва, АО «Издательский дом МЭИ», с. 92-99, ISBN 978-5-383-01320-5

6. Щербаков А.В., Кожеченко А.С., Гончаров А.Л., Рубцов В.П., Погребисский М.Я. Экспресс-контроль геометрических характеристик электронных пучков // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 228-230.

7. Щербаков А.В., Кожеченко А.С., Рубцов В.П., Грибков М.С. XV Разработка системы мониторинга пространственного распределения плотности тока технологических электронных пучков // Международная конференция Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2014

8. Щербаков А.В., Рубцов В.П., Кожеченко А.С., Иващенко М.В., Фоминых А.А. Совместное применение систем автоматизации эксперимента и математических моделей для решения задач диагностики электронных пучков технологических электронных пушек // МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Сборник материалов и докладов. 2015. С. 122-135.

9. Щербаков А.В., Кожеченко А.С., Родякина Р.В., Гапонова Д.А., Хомутский В.А. Пространственные распределения плотности тока технологических электронных пучков // Состояние и перспективы развития

электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. 2017. С. 6-9.

10. Кожеченко А.С., Щербаков А.В. Автоматизированная диагностика технологических электронных пучков // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3-х томах. 2016. С. 133.

11. Кожеченко А.С. Анализ методов мониторинга характеристик технологических электронных пучков // ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК. Материалы XIII международной научно-практической интернет-конференции. ГУ «Орловский региональный центр Энергосбережения». 2015. С. 100-103.

12. A. Shcherbakov, A. Goncharov, A. Kozhechenko, A. Gordenko, A. Sliva, V. Balashov, V. Dragunov, V. Rubtsov. Modern problems and development methods of electron beam welding systems // ELEKTROTECHNICA & ELEKTRONICA E+E, Vol. 49, Issue 5-6 (2014), pp. 7-12

13. Щербаков А.В., Кожеченко А.С. Программа статистического моделирования процесса взаимодействия электронного пучка с многоапертурным коллектором // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016613199. В реестре с 01 июня 2016 г.

14. Щербаков А.В., Кожеченко А.С. Программа моделирования процесса формирования мощных электронных пучков и процессов ионизации // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016615641. В реестре с 26 мая 2016 г.