

## **ОТЗЫВ**

Официального оппонента на диссертационную работу Забелло Константина Константиновича «Исследование влияния магнитных полей различной ориентации на характеристики катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой пятном плазменной струи», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

### **Актуальность**

В настоящее время вакуумная дуга находит применение в установках ионно-плазменного нанесения покрытий, источниках металлических ионов, высоковольтной вакуумной коммутационной аппаратуре. Известно, что наложение аксиального магнитного поля позволяет улучшить характеристики вакуумно-дуговых приборов. Так, применение аксиального магнитного поля позволяет увеличить средний заряд ионов в плазменной струе, генерируемой катодным пятном дуги. В области вакуумно-дугового напыления аксиальное магнитное поле применяется для фильтрации макрочастиц и снижения расширения и охлаждения плазменной струи. В вакуумных коммутаторах, используемых в сильноточных цепях при высоком напряжении, применение аксиального магнитного поля позволяет обеспечить равномерное распределение плотности тока по поверхности электродов и достичь больших токов отключения. При этом на сегодняшний день практически отсутствуют исследования влияния наклонных магнитных полей, имеющих помимо аксиальной еще и тангенциальную составляющую, на характеристики вакуумной дуги, катодных пятен и генерируемых ими плазменных струй, особенно для слаботочных дуг.

Целью работы являлось изучение динамических характеристик катодных пятен, среднего тока катодного пятна, напряжения горения дуги с одиночным катодным пятном, а также формы и направления генерируемой катодным пятном плазменной струи в магнитных полях различной ориентации относительно поверхности катода. В качестве объекта исследования выбрана слаботочная вакуумная дуга с катодами из бескислородной меди, меди-хромовой композиции и тугоплавких металлов - вольфрама и молибдена. Указанные материалы либо применяются в настоящее время в качестве материалов электродов (меди, меди-хромовые композиты), либо являются перспективными для использования в вакуумных устройствах коммутации (тугоплавкие металлы). Характеристики катодных пятен и плазменных струй с катодами из указанных материалов в полях различной ориентации практически не изучены.

Таким образом, рассматриваемое диссертационное исследование является актуальным как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

### **Научная новизна**

Автором впервые исследован ряд характеристик слаботочной вакуумной дуги в наклонном к поверхности катода магнитном поле. В частности, впервые определены средние токи на пятно в зависимости от величины и ориентации поля к нормали к электроду на катодах из четырех выбранных материалов. Автором исследованы

напряжения горения дуги в наклонном магнитном поле (зависимости напряжения от величины аксиального поля при постоянной тангенциальной составляющей) и обнаружено, что данные зависимости имеют характерную форму с минимумом (V-образную); автором измерены характеристики данных зависимостей для различных материалов катодов и дается их качественное объяснение. Автором проведены исследования динамических характеристик катодных пятен – направления распространения и скорости – и углов Робсона от тока переносимого пятном и длины дуги; автором обнаружена зависимость между углом наклона магнитного поля к поверхности и углом Робсона от длины дуги и материала катода. Автором исследованы направление распространения и форма истекающей из катодного пятна плазменной струи и влияние на них наклонного магнитного поля. Автором спектроскопическими методами исследован состав плазменной струи и показано, что плазма струи полностью ионизированная, нейтральные атомы присутствуют только у поверхности электродов, которая эмитирует их вследствие испарения (катод) и распыления ионной бомбардировкой (анод).

### **Научная и практическая значимость**

Научная и практическая значимость работы определяются тем, что полученные результаты и положения, выносимые на защиту, являются новым знанием и представляют интерес как с фундаментально-научной точки зрения - для теоретических исследований динамики катодных пятен и движения плазменной струи катодного пятна, так и с практической точки зрения - для разработки новых устройств для вакуумной коммутационной аппаратуры, напылительных систем.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, определяется комплексным использованием современных средств и различных экспериментальных методик, таких как высокоскоростное фотографирование с последующей компьютерной обработкой полученных результатов, эмиссионная спектроскопия с пространственным и временным разрешением, осциллографические измерения тока дуги и напряжения на ней с малым временем дискретизации. Все представленные в диссертации результаты получены путём статистической обработки измерений и оценки погрешностей. Помимо этого, использованные в работе методы испытаны в режимах, которые ранее были исследованы, и дают результаты, согласующиеся с имеющимися в литературе. Автор достаточно критически подходит к описанию полученных результатов, тщательно анализируя и обсуждая их.

**Содержание диссертации** в части полученных автором результатов в полном объеме отражено в 18-ти публикациях, 8 из которых в виде статей в изданиях из списка ВАК. По основным результатам работы сделано 10 докладов на 8 международных и всероссийских конференциях с публикацией в сборниках материалов конференций.

Диссертация написана логически ясно с использованием общепринятой терминологии, текст тщательно проработан и оформлен, результаты и выводы каждого раздела отдельно резюмируются в кратком виде в конце соответствующего раздела.

Во **введении** автором обоснована актуальность выбранной темы и объекта исследования, обозначены цели и задачи исследования. Показаны научная новизна и научная и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов. Приводится информация об аprobации работы на конференциях и сведения о публикациях, выполненных по результатам работы, и личном вкладе автора в выполненные исследования.

В **первой главе** представлен литературный обзор, в котором рассмотрено и проанализировано современное состояние исследований воздействия магнитных полей на слаботочную вакуумную дугу и генерируемую катодным пятном плазменную струю.

В **второй главе** приводится описание конструкции двух экспериментальных установок, использованных автором в работе. Описывается и обосновывается методика определения направления распространения плазменной струи в наклоненном к поверхности катода магнитном поле.

В **третьей главе** приводятся результаты исследований, выполненных автором и их обсуждение.

В **заключении** кратко резюмируются основные результаты работы, подчеркивается их новизна и потенциальные области их практического использования.

### **Общие замечания по диссертационной работе**

По рассмотренной диссертации имеется ряд вопросов и замечаний.

По оформлению диссертации:

1. В разделе «Структура и объем диссертации» как в самой диссертации, так и в автореферате, указано, что диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Однако, фактически диссертация содержит 3 главы.

По содержанию диссертации:

1. В разделе II.1 описана установка для исследования динамических характеристик КП и, в частности, методика создания магнитных полей. Указано, что калибровка катушек Гельмгольца осуществлялась с помощью датчика SS496A, имеющим рабочий диапазон порядка  $-900 \div 900$  Гс. Непонятно, каким образом проведена калибровка полей вне этого диапазона (до 0,4 Тл).
2. Оценка смещения катодного пятна за время экспозиции матрицы спектрографа, приведенная в разделе III.5 (стр. 105), представляется заниженной более чем в два раза, т.к. рассчитанная величина представляет собой средний квадрат смещения –  $0.2 \text{ мм}^2$ , а не само смещение. Учитывая, что радиус струи составляет порядка 1 мм, ошибка представляется существенной.
3. Экспериментально определенные расстояния, на которых происходит поворот плазменной струи на направление магнитного поля в дуге (раздел III.4, с. 97-103), сопоставляются с результатами теоретического расчета, заимствованными из литературного источника. Остается неясным, о каком качественном соответствии можно говорить, если для двух режимов, для которых проводилось сравнение, различие между экспериментальными и теоретическими результатами составляет от свыше 1,5 до 3 раз, а при изменении теоретического значения более чем на 100

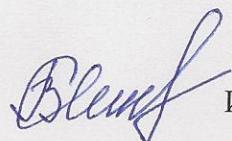
% (при тангенциальных полях  $B_t=0.1$  Тл и  $B_t=0.05$  Тл) определенные в эксперименте значения меняются всего на 10%.

### Заключение

Отмеченные замечания не снижают значимость выполненной автором на высочайшем уровне диссертационной работы и полученных автором результатов и могут быть рассмотрены в качестве рекомендации. Полученные автором результаты являются достоверными и тщательно проанализированными, а выводы и заключения обоснованными. Работа в целом, представляет собой самостоятельное, цельное и законченное научное исследование. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Забелло Константин Константинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,  
старший преподаватель кафедры электроники и  
электроэнергетики ФТФ ПетрГУ

 Игнашин В.С.

«29» января 2016 г.



Подпись руки		<u>от. прт. В.С. Игнашин</u>
УДОСТОВЕРЯЮ.		
Секретарь ученого совета	<u>Братьев АИ</u>	
		» <u>декрт</u> 20 <u>б</u> г.

ФИО официального оппонента: Игнашин Владимир Станиславович

Ученая степень: кандидат физико-математических наук

Специальность: 01.04.04 – физическая электроника

Телефон: (8142) 71-96-81

Адрес электронной почты: [art101@mail.ru](mailto:art101@mail.ru), [ignahin@petrsu.ru](mailto:ignahin@petrsu.ru)

Наименование организации: ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Адрес: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33.