

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д004.024.01 НА БАЗЕ  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
электрофизики Уральского отделения Российской академии наук  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 11.12.2018г. № 7

О присуждении Гашкову Михаилу Алексеевичу ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Динамика расплавленного металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда» по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» принята к защите 11.12.2018 г. протокол № 7 диссертационным советом Д004.024.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, сайт: [www.iер.uran.ru](http://www.iер.uran.ru), утвержденного приказом Рособнадзора № 1246-дс от 18.07.2008 г.

Соискатель Гашков Михаил Алексеевич, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Уральский Федеральный Университет (УрФУ); обучался в аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук с 2014 по 2018 г.; работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории нелинейной динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН Зубарев Николай Михайлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория нелинейной динамики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Сморodin Борис Леонидович, доктор физ.-мат. наук, профессор,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», кафедра физики фазовых переходов, профессор;

Лейви Артём Ячеславович, кандидат физ.-мат. наук, Федеральное государственное автономное учреждение образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра «Физическая электроника», доцент;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск, в своем положительном отзыве, подписанном Ратахиным Николаем Александровичем, академиком РАН, д.ф.-м.н., директором ИСЭ СО РАН указала, что диссертация Гашкова М.А. является самостоятельной и завершенной научно-исследовательской работой, содержащей принципиально новые результаты в области теоретического моделирования электроразрядных процессов, происходящих на поверхности катода вакуумного разряда, а ее автор является квалифицированным специалистом в этой области электрофизики. Результаты работы могут быть полезны специалистам ряда научно-исследовательских организаций: Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Института сильноточной электроники СО РАН, Института электрофизики УрО РАН, а также других научно-производственных организаций и специализированных кафедр вузов, готовящих специалистов в области электрофизических установок, использующих вакуумный дуговой разряд. Диссертация удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и ее автор, Гашков Михаил Алексеевич, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки».

Соискатель имеет 20 работ, опубликованных по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях – 6. Опубликовано 14 работ в сборниках трудов

конференций. В научных журналах, рекомендованных ВАК, опубликовано 6 работ.

Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. В работе обоснована возможность использования метода гидродинамического подобия для сопоставления процессов, происходящих в жидкой фазе катодного пятна вакуумной дуги, и процессов, происходящих при столкновении единичных капель с поверхностью. Для некоторых металлов катода показано, что реализуемые условия соответствуют пороговым условиям образования струй (Formation of liquid-metal jets in a vacuum arc cathode spot: Analogy with drop impact on a solid surface / M. A. Gashkov, N. M. Zubarev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 946. – P. 012131.).

2. В работе предложена аналитическая модель процессов, происходящих в катодном пятне вакуумной дуги. В рамках этой модели удалось определить минимальные значения давления плазмы и протекающего через кратер электрического тока, необходимые для реализации режима расплёскивания (М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, И.В. Уйманов. «Модель расплёскивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда». ЖЭТФ, том 149, вып. 4, стр. 896-908, 2016).

3. В работе на основе данных численного моделирования вытеснения расплавленного металла и формирования вала давлением плазмы определён механизм развития азимутальных неустойчивостей вершины вала и последующее формирование струй. Установлено, что это неустойчивость Релея-Плато (М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, Г.А. Месяц, И.В. Уйманов. «Механизмы образования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумного дугового разряда». Письма в ЖТФ, том 42, вып. 16, стр. 48-55, 2016).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

– от ведущей организации, имеются следующие замечания:

1. При обсуждении защищаемых положений были высказаны общие замечания об их количестве, не отражающем значимость и оригинальность полученных результатов. Как следствие этой избыточности, они количественно и текстуально совпадают с выводами по диссертации, приведенными в Заключение. Хотелось бы чтобы защищаемые положения

были сформулированы более насыщенно с физической точки зрения. В частности, положения 1-2 и 4-5 можно было бы без ущерба для содержания сформулировать в рамках более обобщенных положений.

2. Представляется, что центральным результатом диссертации является вывод о том, что пороговый ток вакуумной дуги может быть рассчитан на основе описания гидродинамической модели движения жидкого металла в кратере. Именно при превышении порогового тока через один эмиссионный центр реализуются условия для течения металла с его расплескиванием на струи. Этот вывод убедительно демонстрируется на примере сопоставления расчетных и экспериментальных данных для медного катода. Хотелось бы получить подобную демонстрацию вывода на примере других металлов, так как в литературе нет недостатка в количественных данных по вакуумным дугам с другими материалами катода.
3. В разделе 2.3 анализируется аналогия с единичным явлением расплескивания металла из кратера и задачей о периодическом процессе последовательного падения капель жидкости. Представляется, что эта аналогия искусственная, и не имеет отношения к предмету исследования. Во всяком случае, соискатель при обсуждении диссертации не смог убедительно пояснить необходимость такой аналогии. Следует пояснить, какую роль в задаче о расплескивании металла из кратера может играть частота падения капель в задаче-аналоге.
4. В Главе 3 соискатель при демонстрации теоретической модели ограничился только одним углом разлета жидкометаллической струи ( $\alpha = 30^\circ$ ) по отношению к плоскости катода. Было бы интересно показать, что будет предсказывать эта модель при других углах, например, тенденцию изменения расчетного порогового тока при изменении этого угла.
5. Есть замечания по стилю изложения и оформлению материала в диссертации. В частности, следует отметить слабую систематизацию крайне разнообразного использования критериев подобия и их формул в Главе 2. Они излагаются в разных разделах главы, проследить логику

последовательного их изложения весьма затруднительно даже для искусственного читателя. Поэтому было бы желательно получить основной вывод, каким критерием (и формулой) все же следует руководствоваться для расчета, например, порогового тока дуги.

Подписи к рисункам и заголовки таблиц оформлены с отклонениями от ГОСТа (например, заголовки таблиц должны быть помещены перед ними).

В отзыве официального оппонента д.ф.-м.н. Б.Л. Смородина имеются следующие замечания:

1. В обзоре литературы (п. 1.4, стр. 52) выписана система уравнений, решавшихся численно в работе [Mesyats G. A., Uimanov I. V. Semiempirical Model of the Microcrater Formation in the Cathode Spot of a Vacuum Arc //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017 – V. 45 – No. 8 – Pp. 2087-2092], но не выписаны граничные условия к этим уравнениям. Между тем, при решении системы уравнений они играют значительную роль и их следовало бы выписать. Кроме того, уравнение (1.35) на странице 52 записано с опечаткой.
2. На рис. 2.1 (стр. 63) на параметрической плоскости  $C_a$ – $\lambda v$  показана граница между областями, в которых реализуются режимы растекания и расплескивания жидкости, и приведены интервалы значений чисел  $C_a$  и  $\lambda v$ , которые, соответствуют условиям, реализующимся в катодном пятне вакуумной дуги при околопороговых токах. При этом, используется интервал токов через одиночный кратер от порогового до двух пороговых ( $I = 1.6 - 3.2$  А), и для значения  $I = 3.2$  А наблюдается хорошее согласие. Однако пояснения, почему необходимо рассматривать значение тока, равное двум пороговым, в диссертации отсутствует.
3. Сопоставляя процессы динамики жидкого металла в вакуумной дуге и границы между режимами растекания и расплескивания жидкости (рис. 2.2 на стр. 70) можно видеть, что для Cu, Au, Mo принцип гидродинамического подобия выполняется хорошо. Для W отклонение от порога между режимами растекания и расплескивания составляет 50%. Можно ли при этом говорить, что и в этом случае принцип гидродинамического подобия работает?

4. Из текста диссертации неясно, кем получены результаты численного моделирования динамики поверхности расплава при образовании кратера на медном катоде (рис. 4.1 на стр. 103).
5. В разделе 2.1.2 на странице 61 во второй формуле сверху под знаком интеграла отсутствует элемент интегрирования.

В отзыве официального оппонента к.ф.-м.н. А.Я. Лейви имеются следующие замечания:

1. На странице 17, рисунок 1.5 и в тексте диссертационной работы отсутствует определение и размерность величины  $V$ .
2. На странице 43 обсуждается неустойчивость Рихтмайера-Мешкова, как один из возможных механизмов образования короны при разбрызгивании капли. Классическая неустойчивость Рихтмайера-Мешкова - неустойчивость границы раздела двух сред различной плотности при прохождении через нее ударной волны. Из текста непонятно, откуда берется ударная волна при формировании короны.
3. В третьей главе для определения характерных величин используется значение радиуса кратера, которое определяется экспериментально. Очевидно, что радиус кратера определенный экспериментально, то есть на момент кристаллизации расплава и радиус кратера в жидкой фазе отличаются по значению. Из текста диссертации не понятно, насколько такое расхождение существенно для исследуемых процессов.
4. В третьей главе были проведены оценки характерного времени расплескивания и числа Вебера основываясь на предположении, что скорость жидкости при ее инерциальном движении постоянна. Далее в третьей главе и четвертой главе делается вывод, что скорость развития неустойчивости Релея-Тейлора существенно меньше, чем Релея-Плато. В связи с этим представляется, что полученная оценка скорости развития неустойчивости Релея-Тейлора занижена.
5. Текст диссертационной работы содержит небольшое количество неточностей и опечаток. К примеру, страница 106 диссертационной работы.

Пришло 3 отзыва на автореферат. Из них 1 отзыв положительный без замечаний: от заведующего лабораторией электрофизических исследований ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.-м.н. Баренгольца С.А.

Остальные 2 отзыва положительные с замечаниями и вопросами:

От профессора кафедры компьютерного моделирования и нанотехнологий Южно-Уральского госуниверситета, д.ф.-м.н. Яловца А.П.: на основе метода гидродинамического подобия автором получены результаты для минимального диаметра кратера 4 мкм, размер которого при токе менее 10 А остается постоянным, но нет обсуждения вопроса о применимости данного метода для описания, например, времени дугового разряда при больших диаметрах кратера, зависящих от величины тока.

От профессора Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, доцента, д.ф.-м.н. Белоножко Д.Ф.: в качестве замечания по автореферату можно отметить, что из текста не всегда понятно, какие именно значения физических величин, например, коэффициента поверхностного натяжения расплавленного металла, были использованы для выполнения оценочных расчетов. Этот недочет не уменьшает значимости результатов исследования. Общее впечатление от работы самое благоприятное.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации. Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Смородин Б.Л. является специалистом в гидродинамике жидкости во внешнем электрическом поле. У официального оппонента, кандидата физико-математических наук, Лейви А.Я., основные работы посвящены модификации поверхностей интенсивными потоками энергии, включая процессы кратерообразования. Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) является одним из ведущих институтов, проводящим исследования в области вакуумного дугового разряда.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– Сопоставлено поведение расплавленного металла в катодном пятне вакуумной дуги с поведением жидкости при столкновении как одиночных, так и серий капель с плоской твердой поверхностью с использованием принципа гидродинамического подобия. В последнем случае удалось учесть цикличность функционирования дуги.

– Предложен критерий формирования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги, основанный на сравнении скорости истечения расплава из формирующихся кратеров и групповой скорости волн на поверхности жидкости.

– Предложена аналитическая модель расплескивания жидкого металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда, в рамках которой определены пространственные и временные характеристики этого процесса. Также в рамках модели найдены минимальные значения давления плазмы и протекающего через отдельный кратер электрического тока, необходимые для реализации режима расплескивания жидкого металла и, как следствие, самоподдержания дугового разряда в рамках эктонной модели.

– Установлено, что за развитие азимутальных неустойчивостей свободной поверхности жидкого металла, вытесняемого давлением плазмы из формирующихся кратеров катодного пятна вакуумной дуги, и последующее формирование струй ответственна имеющая капиллярную природу неустойчивость Релея-Плато. Подобный механизм образования струй реализуется в широком диапазоне токов ячеек катодного пятна и их размеров.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что доказаны:**

– Соответствие условий, реализующихся в катодном пятне при околопороговых токах, условиям смены режимов движения жидкости при столкновении как одиночных, так и серии капель жидкости с твердой преградой (от ее растекания по катоду к расплескиванию формированию струй и капель). Ранее подобных исследований не проводилось.

– Наличие полученного критерия формирования жидкометаллических струй и, следовательно, самоподдержания вакуумного дугового разряда, основанного



на сравнении скорости истечения расплава из формирующихся кратеров и групповой скорости поверхностных волн.

- Пороговый характер процесса образования струй в рамках представленной аналитической модели гидродинамических процессов в катодном пятне, ответственных за функционирование элементарной ячейки вакуумной дуги.
- Ответственность за образование и развитие микронеоднородностей, появляющихся при истечении жидкого металла из микрократеров на поверхности катода вакуумной дуги, в широком диапазоне токов неустойчивости Релея-Плато.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

- Продемонстрирована значимость процессов образования микронеоднородностей поверхности катода за счёт гидродинамических процессов, сопровождающих образование микрократеров, что в части формулировки пороговых условий может быть полезно при конструировании электрофизических установок, в которых возможно зажигание дуги.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- Используются классические и современные методы теоретического описания динамики жидкости.
- Использован принцип гидродинамического подобия, позволяющий сопоставлять процессы с различными характерными пространственно-временными масштабами: протекающими в катодном пятне и при столкновении капель жидкости с твердой поверхностью. Возможность его применения обусловлена тем обстоятельством, что в обоих случаях жидкость занимает ограниченный объем и обладает исходной кинетической энергией.
- Совпадение картин, полученных на основе комбинирования численного двумерного моделирования и аналитического описания трехмерных процессов в катодном пятне, и полученной картины рельефа поверхности с фотографиями катодов после горения разряда.

- Демонстрация хорошего согласия результатов работы с результатами других авторов и данными экспериментов в широком диапазоне параметров для различных материалов катода.

**Личный вклад соискателя заключается в:**

участии в разработке подходов к определению механизма формирования струй; самостоятельной разработке программного кода для описания развития различного рода трехмерных неустойчивостей поверхности жидкого металла, развивающихся при нарушении осевой симметрии формирующегося жидкометаллического вала; участии в разработке аналитической модели формирования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги; реализации подхода к качественному описанию динамики жидкой фазы в катодном пятне вакуумной дуги, основанного на сопоставлении соответствующих процессов с процессами при столкновении как отдельных, так и серии капель с твердой поверхностью в рамках принципа гидродинамического подобия. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 11.12.2018 г. Диссертационный совет принял решение присудить Гашкову Михаилу Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета

Д004.024.01

Ученый секретарь

диссертационного совета



Шпак Валерий Григорьевич

Медведев Михаил Владимирович

Дата оформления Заключения

11.12.2018 г.