

ОТЗЫВ

официального оппонента д. ф.-м. н., профессора Б. Л. Смородина

на диссертацию Михаила Алексеевича Гашкова

«Динамика расплавленного металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 — электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа М.А. Гашкова посвящена теоретическому исследованию процессов, происходящих в жидкой фазе на поверхности катода при горении вакуумного дугового разряда. В работе выявлен механизм образования жидкометаллических струй из формирующихся кратеров в катодном пятне вакуумной дуги, а также сформулирован критерий формирования таких струй. Показано, что параметры движения расплавленного металла в катодном пятне при околопороговых токах соответствуют критическим условиям образования струй при столкновении капель с поверхностью. Сделаны оценки основных пространственных и временных характеристик процесса вытеснения жидкого металла из формирующихся кратеров с его расплескиванием.

Актуальность исследований диссертанта обусловлена необходимостью понимания механизмов самоподдержания вакуумного дугового разряда, связанных с взрывной электронной эмиссией из-за электрического взрыва образующихся в катодном пятне струй жидкого металла, а также механизмов эрозии катода. В этом смысле представленная диссертационная работа вызывает интерес, и ее актуальность несомненна.

Высокая степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, достоверности результатов обусловлены использованием классических и современных методов теоретического описания динамики жидкости: принципа гидродинамического подобия, теории поверхностных волн в идеальной несжимаемой жидкости и аналитического описания трехмерных

процессов в катодном пятне, совпадением полученной картины рельефа поверхности с фотографиями катодов после горения разряда, хорошим согласием полученных в работе результатов с результатами других авторов и экспериментальными данными в широком диапазоне параметров для различных материалов катода.

В диссертации содержится целый ряд **новых результатов**, среди которых следует особенно отметить:

1. Продемонстрировано, что основные закономерности процессов, происходящих в жидкой фазе катодного пятна вакуумной дуги с учетом цикличности ее функционирования, могут быть описаны в рамках принципа гидродинамического подобия на основе сопоставления с процессами расплескивания жидкости при последовательном столкновении серии капель с поверхностью. Показано, что условия, реализующиеся в катодном пятне при околопороговых токах, соответствуют условиям смены режимов движения жидкости (от ее растекания по катоду к расплескиванию – формированию струй и капель).

2. На основе сравнения скорости истечения расплава из формирующихся кратеров и групповой скорости поверхностных волн получен теоретический критерий формирования жидкометаллических струй и, следовательно, самоподдержания вакуумного дугового разряда.

3. Представлена аналитическая модель гидродинамических процессов в катодном пятне, ответственных за функционирование элементарной ячейки вакуумной дуги. В рамках модели определены пространственные и временные характеристики этого процесса, такие как скорость истечения расплавленного металла из формирующихся кратеров, время образования струй, их количество. Найдены минимальные значения давления плазмы и протекающего через кратер электрического тока, необходимые для расплескивания жидкого металла. Продемонстрировано, что процесс образования струй носит пороговый характер.

4. Для осесимметричного жидкометаллического вала, вытесненного давлением плазмы из кратера катодного пятна вакуумной, дуги проведено сравнение

поведения азимутальных неустойчивостей Релея-Плато и Релея-Тейлора. Установлено, что за образование и развитие микронеоднородностей, появляющихся при истечении жидкого металла из кратеров на поверхности катода, и дальнейшее формирование струй в широком диапазоне токов ответственна неустойчивость Релея-Плато.

Научное значение работы заключается в том, что полученные результаты важны для понимания механизмов самоподдержания вакуумной дуги, обусловленной возникновением микроострий на поверхности катода, в которых реализуются условия для инициирования взрывной электронной эмиссии. В диссертационной работе исследуется образование подобных микронеоднородностей за счет гидродинамических процессов, сопровождающих образование микрократеров на поверхности катода. Полученные результаты важны для понимания механизмов самоподдержания вакуумной дуги, а также механизмов эрозии катода.

Практическое значение диссертационной работы состоит в том, что результаты в части формулировки пороговых условий горения дуги могут быть полезны при конструировании электрофизических установок, в которых возможно зажигание вакуумной дуги.

Оценка диссертации. Диссертация написана в целом ясно, грамотно; оформлена аккуратно, иллюстрирована графиками и рисунками. По содержанию диссертации можно сделать 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 $Ca-\lambda_v$ показана граница между областями, в которых реализуются режимы растекания и расплескивания

жидкости, и приведены интервалы значений чисел Ca и λ_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.

Необходимо отметить, что сделанные замечания не изменяют общего положительного впечатления от диссертационной работы. Автореферат диссертации в целом полно и правильно отражает ее содержание.

Заключение по диссертации. Проведенный выше анализ позволяет утверждать, что рассматриваемая диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Ее основное содержание отражено в периодической печати (три статьи принадлежит изданиям, индексируемым в системе Web of Science), доложено на Всероссийских и международных конференциях. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертацию «Динамика расплавленного металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда» следует признать целостной и законченной научно-квалификационной работой, уровень и результаты которой соответствуют критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор – Михаил Алексеевич Гашков – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 — «Электрофизика, электрофизические установки».

Официальный оппонент, профессор кафедры физики фазовых переходов
Пермского государственного национального исследовательского университета,
доктор физико-математических наук, профессор

21 ноября 2018

Борис Леонидович Смородин

Рабочий адрес: 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

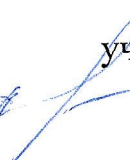
ВГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Тел.: +7(342)2-396-506

e-mail: bsmorodin@yandex.ru

Подпись Смородина Б.Л. удостоверяю




ученый секретарь
Антропова Е.П.