

## ОТЗЫВ

научного руководителя Зубарева Николая Михайловича  
на диссертацию Гашкова Михаила Алексеевича  
«ДИНАМИКА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В КАТОДНОМ ПЯТНЕ  
ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА»  
представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки

Гашков Михаил Алексеевич выполнял курсовые и дипломные работы в Лаборатории нелинейной динамики ИЭФ УрО РАН во время учебы в УрФУ. По окончании университета (в 2014 году) поступил к нам в аспирантуру. Соответственно, диссертационная работа была сделана за отведенные четыре года аспирантуры.

Темой диссертации является теоретическое описание гидродинамических процессов в жидкой фазе ячейки катодного пятна вакуумной дуги – формирования жидкометаллических струй и капель при образовании кратеров на катоде. Ранее нам удалось добиться определенного прогресса в понимании механизмов процесса образования струй – была выдвинута гипотеза о том, что за образование струй может быть ответственна неустойчивость Рэлея-Плато. Было также выдвинуто предположение, что процессы в жидкой фазе катодного пятна могут протекать аналогично процессам, сопровождающим столкновение капель с твердой преградой. Задачей, поставленной перед М.А. Гашковым, была проверка этих гипотез, а также разработка на их основе моделей расплескивания жидкого металла в катодном пятне. Он успешно справился с этими задачами.

Основными результатами, полученными М.А. Гашковым являются:

- на основе принципа гидродинамического подобия проведено сопоставление динамики расплавленного металла в катодном пятне вакуумного дугового разряда с динамикой жидкости при столкновении капли с плоской твердой поверхностью; для ряда материалов катода показано, что реализующиеся при близких к минимальным токам условия соответствуют пороговым условиям образования струй;

- обоснована применимость метода гидродинамического подобия для сопоставления процессов, происходящих в жидкой фазе катодного пятна вакуумной дуги с учетом цикличности ее функционирования, и процессов расплескивания жидкости при последовательном столкновении серии капель с поверхностью: безразмерные гидродинамические числа, характеризующие эти процессы, практически совпадают, несмотря на значительную разницу в пространственно-временных масштабах (микрометры и наносекунды для дугового разряда и миллиметры и миллисекунды для падения капель);

- 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 модели определены пространственные и временные характеристики этого процесса: скорость истечения расплавленного металла из формирующихся кратеров, время образования струй, их количество;

- определены минимальные значения давления плазмы и протекающего через кратер электрического тока, необходимые для реализации режима расплескивания жидкого металла и, следовательно, 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.

Хочу отметить высокую трудоспособность М.А. Гашкова: за время прохождения аспирантуры было опубликовано четыре статьи в ведущих физических журналах (ЖЭТФ, Письма в ЖТФ, Известия ВУЗов - Физика, Journal of Physics: Conf. Series), также вышло две работы в индексируемых трудах конференции ISDEIV; результаты исследований были представлены на значительном числе профильных российских и международных научных конференций и опубликованы в их трудах.

Считаю, что диссертационная работа М.А. Гашкова удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор является сложившимся специалистом в области электрофизики и заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки.

Главный научный сотрудник  
Института электрофизики УрО РАН,  
чл.-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук

Н.М. Зубарев

Подпись Н.М. Зубарева заверяю:

Ученый секретарь  
Института электрофизики УрО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

Е.Е. Кокорина

1.10.2018

