

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АНОДА ПОСЛЕ ПОГАСАНИЯ  
СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ**

Магистерская диссертация студента

дневного отделения

\_\_\_\_\_ **Яковлева Виталия Викторовича**

Научный руководитель:

\_\_\_\_\_ к. ф.-м. н., доц. **Павлейно М. А.**

Рецензент:

к. ф.-м. н., н. с. ФТИ им. Иоффе РАН

\_\_\_\_\_ **Забелло К. К.**

Санкт-Петербург

2017

## Оглавление

Введение .....	3
1. Обзор литературы .....	8
1.1. Свободногогорящая вакуумная дуга .....	8
1.2. Стабилизированная аксиальным магнитным полем вакуумная дуга .....	13
1.3. Особенности поджига разряда в КС TEL .....	18
1.4. Измерение температуры поверхности анода .....	19
1.5. Пробой промежутка восстанавливаемым напряжением .....	25
2. Техника и методика эксперимента .....	28
2.1. Экспериментальная установка .....	28
2.2. Измерение температуры анода .....	30
2.2.1. Коэффициент излучения композиции CuCr .....	31
2.2.2. Прямая съемка анода .....	32
2.2.3. Съемка анода через два интерференционных фильтра .....	37
2.3. Характеристики исследуемых КС .....	41
2.3.1. Расчет магнитных полей в пакете Comsol Multiphysics .....	43
2.3.2. Использование результатов измерений АМП для контроля деградации КС .....	47
3. Результаты эксперимента и обсуждение .....	50
3.1. Процессы на аноде во время горения дуги .....	50
3.2. Температура анода непосредственно после погасания разряда .....	58
3.2.1. КС TEL-64 .....	58
3.2.2. КС TEL-50 .....	62
3.2.3. КС TEL-55 .....	66
3.3. Остывание анода .....	70
3.4. Процессы на катоде .....	74
4. Заключение .....	80
Выводы .....	85
Литература .....	87
Приложения .....	91
Приложение 1. Тепловое излучение и его характеристики .....	91
Приложение 2. Расчет АМП. Постановка численной задачи .....	93

## Введение

Вакуумная дуга – это сильноточный низковольтный электрический разряд между двумя металлическими контактами в вакууме [1]. Разряд в вакууме существует благодаря наличию обратной связи между дугowymi процессами в промежутке и эрозионными процессами на электродах – после возникновения дуги межэлектродный промежуток быстро заполняется плазмой, состоящей из ионизованного металлического пара.

Процессы, происходящие на катоде, очень сложны и относятся к явлениям, определяющим само существование разряда. Основным источником плазмы при горении дуги являются катодные пятна (КП) [2] – локальные сугубо нестационарные привязки, замыкающие на себя ток огромной плотности ( $\sim 10^8$  А/см<sup>2</sup>) и имеющие очень высокую температуру. КП возникают на поверхности катода в результате акта взрывной эмиссии и являются так же поставщиками нейтрального пара и расплавленных капель. Размер КП составляет от единиц до сотни микрон, время жизни на порядки меньше времени существования разряда (от единиц нс до сотни мкс) [3]. После отмирания КП на поверхности катода остается углубление с бруствером (называемое кратером), а неподалеку от него возникает новое КП.

Количество КП пропорционально величине тока разряда. Выделяют слаботочную ( $10^1$ - $10^2$  А) вакуумную дугу, которая характеризуется наличием одного или нескольких КП, и сильноточную ( $10^4$ - $10^5$  А) вакуумную дугу (СВД), характеризуемую большим количеством КП. Свойства КП зависят от материала катода и состояния его поверхности. КП принято разделять на две группы – КП первого и второго рода. Первые возникают на неочищенных (окисленных) поверхностях, вторые – на чистых. В СВД принято говорить о пятнах второго рода, т.к. разряд в процессе горения эффективно очищает поверхность электрода.

**Актуальность исследований разряда дугового типа в вакууме** помимо чисто научного интереса связана с прикладным направлением – разработкой вакуумных выключателей (ВВ), предназначенных для коммутации (включения и отключения) электрического тока в высоковольтных сетях переменного напряжения. Использование ВВ обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с использованием воздушных и масляных выключателей. Это, например, низкие массогабаритные показатели, простота эксплуатации и снижение эксплуатационных затрат, экологическая безопасность. Исследования процессов, протекающих в ВВ при горении дуги, позволяют развивать данную отрасль.

Одними из основных элементов вакуумного выключателя являются вакуумная дугогасительная камера (ВДК), электромагнитный привод и устройство управления.

Исследуемые в настоящей работе физические процессы локализованы в ВДК. Одна из основных характеристик ВДК – предельная отключающая способность (ПОС), т.е. максимальный отключаемый ток. Рассмотрим конструкцию ВДК. Внутри камеры расположены неподвижный и подвижный контакты. Подвижный контакт крепится в камере с помощью сварного сильфона. Во включенном состоянии подвижный электрод поджат к неподвижному с помощью пружины, что обеспечивает необходимый гальванический контакт при протекании тока. Для отключения тока привод отрывает подвижный контакт от неподвижного. При разрыве нагруженных током контактов между ними поджигается вакуумная дуга. При переходе тока через ноль разряд гаснет, после чего на контактах выключателя восстанавливается переходное напряжение (ПВН), которое может привести к пробой промежуток и повторной инициации дуги. Задача ВВ будет выполнена, когда после первого (в крайнем случае, второго) нуля тока прикладываемое ПВН не спровоцирует инициации разряда в промежутке, т.е. протекание тока в цепи окажется невозможным. Это будет выполнено в случае, если [2]:

- К моменту приложения ПВН электроды будут разведены на достаточное расстояние.
- После погасания дуги в промежутке быстро восстановится вакуум, нарушенный при горении дуги.

Для обеспечения первого пункта привод ВВ должен иметь необходимую скорость размыкания электродов. Данный вопрос находится за рамками настоящей работы. Основная проблема второго пункта состоит в том, что при больших плотностях тока поверхность анода (как наиболее энергетически нагруженного электрода) в процессе горения дуги может быть значительно разогрета, и к нулю тока температура анода может оставаться высокой. Это будет обеспечивать большую скорость испарения материала. В итоге, при приложении ПВН может произойти пробой межэлектродного промежутка и отказ выключателя.

Очевидно, что для повышения отключающей способности необходимо обеспечить наиболее равномерное распределение тока по поверхности электродов. Этого удастся добиться путем стабилизации дуги аксиальным магнитным полем (АМП). В коммутационных модулях для генерации такого поля используются контактные системы (КС) специальной конструкции, называемые АМП – контактами, генерирующие собственное АМП протекающим током.

Однозначного ответа, при каких температурах анода и, соответственно, давлениях пара может произойти пробой, в настоящее время нет. Например, по мнению авторов

работы [4], пробой происходит с большой вероятностью, если концентрация металлического пара в промежутке достигает  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (при зазоре  $\sim 1 \text{ см}$ ). Концентрация насыщенных паров медь-хромовых электродов составляет  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  при температуре  $\sim 2000 \text{ К}$ . Это соответствует давлению  $\sim 100 \text{ Па}$ . Авторы работ [5, 6], считают, что важную роль в пробое играют малые частицы (капли), отрывающиеся от электродов и имеющие высокую температуру, однако температуры капель в этих работах не определялись, и сама причина появления капель не исследовалось. Единого представления о механизме и условиях пробоя пока нет.

К началу настоящей работы количество опубликованных трудов по определению температуры поверхности анода весьма мало – не более десятка. Причем, большая часть работ была проведена без пространственного разрешения, в то время как интересны пространственные распределения температуры по поверхности анода. Так же минимальна информация о температуре капель. Известна лишь одна работа [7], в которой обнаружены капли, разогретые до температуры  $1750 \text{ К}$ . Сказанное выше определяет **актуальность темы диссертации**.

**Целью** настоящей работы является исследование теплового состояния поверхности анода после погасания разряда, обнаружение режимов с каплями, определение причин появления капель и их температуры. На основании полученных результатов сделать вывод об условиях, необходимых для пробоя промежутка восстанавливаемым напряжением.

Исследования проводились в трех различных промышленных АМП электродных системах с различной отключающей способностью и АМП характеристиками: TEL-50, TEL-55, TEL-64. Отметим, что в ходе эксплуатации электроды, в зависимости от режимов и истории токовых воздействий, в той или иной мере деградируют. В частности, ухудшаются АМП характеристики, что может приводить к снижению отключающей способности. Потому, в ходе исследований важно контролировать состояние электродов и генерируемые ими магнитные поля во избежание проведения исследований в сильно деградировавших КС с заведомо сниженной верхней границей отключающей способности.

Учитывая сказанное выше, **задачи**, которые были поставлены и решены для достижения цели работы, были сформулированы следующим образом.

- исследовать распределение температуры по поверхности анода непосредственно после погасания разряда в широком диапазоне амплитуд воздействующих токов;
- обнаружить режимы с каплями, исследовать причины их появления и динамику движения. По возможности определить температуру капель;

- исследовать процесс остывания электродов и капель;
- обеспечить контроль состояния контактов и генерируемых ими АМП;

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем.

В работе было установлено, что в момент погасания разряда в промежутке обнаруживаются капли двух сортов.

- Первый сорт капель имеет анодное происхождение. **Анодные капли** образуются в результате разрушения жидкого гребня, формирующегося на аноде в процессе горения дуги. В работе были измерены **температуры анодных капель**.
- Источником капель второго сорта в промежутке является катод. Свойства **катодных капель** существенно отличаются от свойств капель, генерируемых катодным пятном, горящем на интегрально холодной поверхности электрода.

**Научная и практическая значимость работы.** Большинство полученных в работе результатов являются новыми и представляют интерес с точки зрения физики дугового вакуумного разряда, а также могут быть использованы для разработки новых ВДК и для совершенствования конструкции существующих.

**Методом исследования** температуры является пирометрический метод, основанный на сравнении яркости теплового излучения исследуемого тела с яркостью теплового излучения тела известной температуры. Данная методика, использовалась, например, в работах [7-10].

**Достоверность** определяемых температур обеспечивается использованием в качестве регистратора теплового излучения современной высокоскоростной 12-ти битной камеры Phantom Miro M310 с интерференционным фильтром. В работе применялась компьютерная обработка результатов. Измерения производились многократно, результаты хорошо воспроизводимы. Спектральный коэффициент излучения медь-хромовой композиции был взят из [7].

В большинстве случаев на временных зависимостях температуры анода после погасания дуги наблюдалось плато на уровне  $\sim 1250-1350$  К, что близко к температуре плавления меди, которая является основной компонентой медь-хромовой композиции, из которой изготовлена накладка электрода. Данное обстоятельство является аргументом в качестве подтверждения достоверности определяемых значений температур.

В настоящей работе также специально была проведена серия съемок поверхности анода через два параллельно установленных интерференционных фильтра (глава 2.2.3.), что

позволяет определять температуру тела без информации о коэффициенте излучения поверхности. Полученные данным способом температуры оказались близки с температурами, определяемыми при съемке через один интерференционный фильтр.

Электрические измерения характеристик дуги проводились с помощью цифрового осциллографа Agilent DSO5014A с дифференциальным пробником N2772A. Достоверность полученных магнитных характеристик контактных систем обеспечивалась сопоставлением результатов экспериментальных измерений магнитного поля (с помощью калиброванного датчика Холла Honeywell SS496A) и компьютерного моделирования в лицензионном пакете COMSOL Multiphysics.

**Апробация работы.** Часть результатов настоящей работы (измерение температуры поверхности анода в КС TEL-64) была представлена на 27-м международном симпозиуме ISDEIV (Международный Симпозиум по Разрядам и Электрической Изоляции в Вакууме) [1a]. По тем же материалам была сдана в печать статья в международный журнал IEEE Transactions on Plasma Science [2a].

# 1. Обзор литературы

## 1.1. Свободногогорящая вакуумная дуга

Термин «вакуумная дуга» требует некоторого пояснения, ведь протекание тока в вакууме невозможно без эмиссии в объем проводящего ток вещества. Разряд протекает в изначально вакуумированном промежутке благодаря образованию в промежутке проводящей среды – плазмы. Образование в промежутке плазмы обеспечивается за счет процессов эрозии электродов. По имеющимся на сегодняшний день представлениям основным поставщиком плазмы является катод, а точнее существующие на его поверхности локально перегретые (до температуры, превышающей температуру кипения материала катода) токовые привязки – катодные пятна (КП). КП (Рисунок 1.1.) – сложный по своей природе самоорганизующийся объект, состоящий из перегретого объема металла и покрывающего его облака эрозионной плазмы. КП является источником сверхзвуковой струи плотной сильноионизованной плазмы. В катодном пятне реализуется механизм взрывной электронной эмиссии ВЭЭ [11]. Явление ВЭЭ представляет собой последовательность актов взрывов микроскопических объемов на поверхности катода. В каждом таком акте ( $\sim 1 \div 10$  нс) эмитируются электроны, пары и капли материала катода.

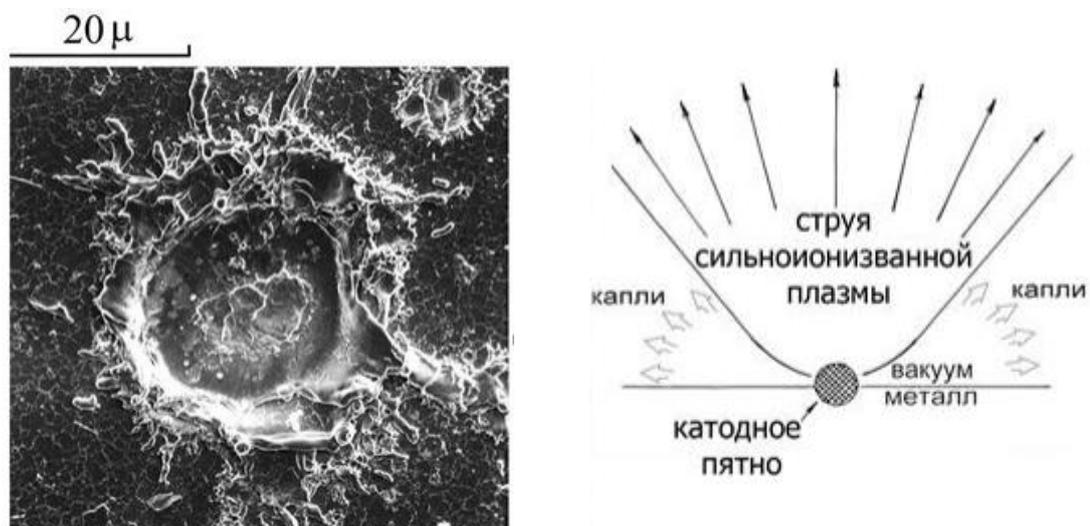


Рисунок 1.1. КП вакуумной дуги. Слева - эрозионный след КП [12] (снимок сделан электронным сканирующим микроскопом). Справа – схематическое представление КП [2].

Параметры КП, как говорилось во введении, сильно зависят от материала катода и от состояния его поверхности с точки зрения наличия диэлектрических пленок. Согласно введённой В. И. Раховским [13] классификации различают два типа КП: КП первого и второго рода. Для пятен первого рода, горящих на «загрязненных» поверхностях, характерны, например, малый размер эрозионного кратера ( $\sim 1-10$  мкм), низкие значения

коэффициента электропереноса и большие скорости движения пятен. По мере очистки поверхности пятнами первого рода на смену им приходят КП второго рода. Ниже приведены некоторые параметры таких КП в свободногорящих слаботочных дугах, существующих на поверхности металлов с не слишком низкой температурой плавления [2]:

- Средний ток, пропускаемый КП:  $I \sim 10^2$  А
- средний радиус КП:  $r \sim 10^{-3}$  см
- Средняя плотность тока в КП:  $j \sim 10^7$  А/см<sup>2</sup>
- Среднее время жизни КП:  $\tau \sim 10^{-5}$  с
- Средняя скорость эрозии:  $\eta \sim 10^{-4}$  г/С

Малое время жизни КП способствует многократному рождению и отмиранию пятен. Отмирание КП и рождение нового пятна неподалеку принято называть движением КП. Для пятен второго рода, как правило, новое пятно рождается на бруствере кратера отмершего пятна. Установлено (например [12]), что при горении дуги с одним КП в отсутствие внешних магнитных полей пятно совершает случайные блуждания по поверхности электрода (Рисунок 1.2.). При наложении на такую дугу внешнего тангенциального (параллельного поверхности электрода) магнитного поля (ТМП) на хаотическое движение накладывается дрейф в «антиамперовом» направлении, т.е. в направлении обратном тому, в котором действует на проходящий в КП ток сила ампера. Данное направление часто называют также ретроградным.

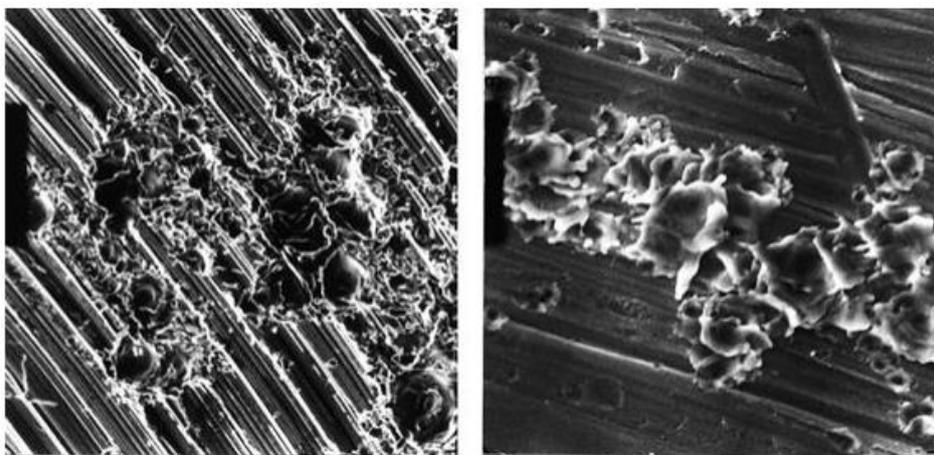


Рисунок 1.2. Снимки эрозионных следов слаботочной ВД на катоде [12], сделанные с помощью электронного сканирующего микроскопа. Слева – свободногорящая дуга, справа – с наложением внешнего тангенциального магнитного поля.

При наложении магнитных полей, вектор индукции которых наклонен к поверхности (т.е. таких магнитных полей, где есть и тангенциальная и нормальная к поверхности

электроды компоненты) направление движение отклоняется от ретроградного на некоторый угол, названный углом Робсона [например 14, 15]. В [15] также были тщательно исследованы зависимости среднего тока, пропускаемого КП и скорости движения КП от прикладываемых внешних магнитных полей различных ориентаций для катодов из различных материалов. В частности было установлено, что скорость КП и величина среднего пропускаемого тока увеличивается по мере роста тангенциального магнитного поля. Что касается эрозионных свойств КП, то в [16] было показано, что максимум переносимого тока ионами, генерируемыми КП, составляет порядка 10% от суммарного тока разряда. Энергии генерируемых ионов достаточно велики (десятки электрон вольт), зависят от заряда иона и материала катода [17]. Для медного катода, например, максимум распределения энергии, одно-, двух- и трехзарядных ионов составляет порядка 50 эВ. Энергия электронов по разным данным составляет 1-5 эВ. ВД также генерирует капли, размер которых меняется в широких пределах от долей микрона до сотен микрон. Количество капель растёт с уменьшением их размера. Капли эмитируются под небольшими углами к поверхности катода. Скорость капель может достигать  $\sim 10^4$  см/с [18].

В слабых дугах, при уменьшении тока разряда ниже некоторого критического значения (для меди  $\sim 3$  А) потухает последнее КП, и гаснет разряд. Если ток в цепи превосходит пропускаемый одним КП средний ток, то пятно «делится», т.е. рядом появляется второе КП. По мере роста тока разряда количество КП растёт вместе с током. В вакуумных дугах с токами порядка нескольких килоампер (сильноточных дугах) количество КП может достигать нескольких сотен.

После инициации сильноточной ВД происходит расширение дугового канала в силу ретроградного движения КП под действием ТМП, генерируемого дуговым током. При сравнительно небольших амплитудных значениях тока контракция разряда наблюдается только на начальном этапе непосредственно после поджига дуги [2]. Развитая дуга при этом находится в т.н. «диффузной» моде, характеризуемой в целом однородным распределением тока по поверхности электродов (Рисунок 1.3.). В таком режиме отсутствуют заметные эрозионные поражения электродов, а поверхности контактов в среднем остаются сравнительно холодными. При достижении КП края электрода (это происходит тем быстрее, чем больше дуговой ток, т.к. увеличивается генерируемое током ТМП и скорость движения КП) горение разряда становится неустойчивым [19].

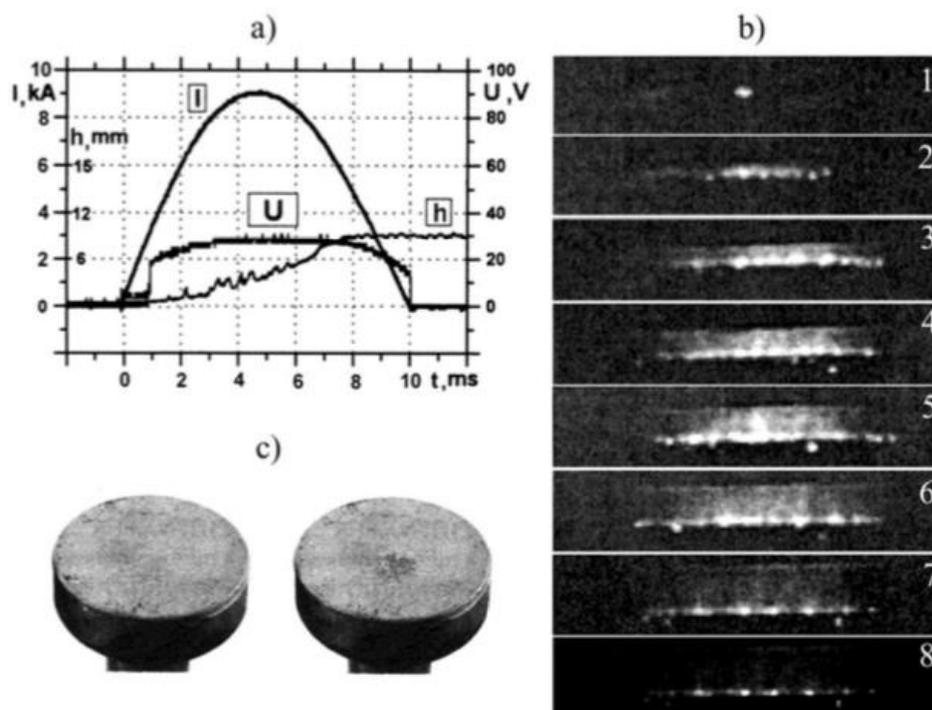


Рисунок 1.3. Результаты испытаний контактной системы с торцевыми электродами (катод снизу) [2]. Амплитудное значение тока меньше критического.

а) Осциллограммы тока (I), напряжения (U) и сигнала, пропорционального длине межэлектродного промежутка (h);

б) Выборка кадров скоростного фотографирования дуги в различные моменты времени:

1.  $t=1$  ms, 2. - 2 ms, 3. - 3 ms, 4. - 4 ms, 5. - 5 ms, 6.- 6ms, 7.- 9ms, 8.- 10ms;

с) фотографии контактных накладок после испытаний, катод слева

Значительная часть ионов, генерируемых КП, в таком случае направлена не в сторону анода, вследствие чего концентрация плазмы перед анодом падает, ухудшается проводимость, и начинает снижаться ток в цепи (Рисунок 1.4.). Появляются выбросы напряжения, связанные с изменением знака анодного падения потенциала с отрицательного на положительный. Положительное падение анодного потенциала отражает катодные ионы в сторону катода, увеличивая концентрацию плазмы перед ним, что провоцирует образование новых КП в приосевой области катода. Горение дуги стабилизируется, но лишь на то время, пока вновь образовавшиеся КП не окажутся на краю электрода. Процесс циклически повторяется. Описанное выше состояние дуги может привести к контракции разряда на аноде и образованию анодного пятна, которое является источником мощной плазменной струи. Появление анодного пятна носит пороговый характер и возникает при достижении током некоторого значения.

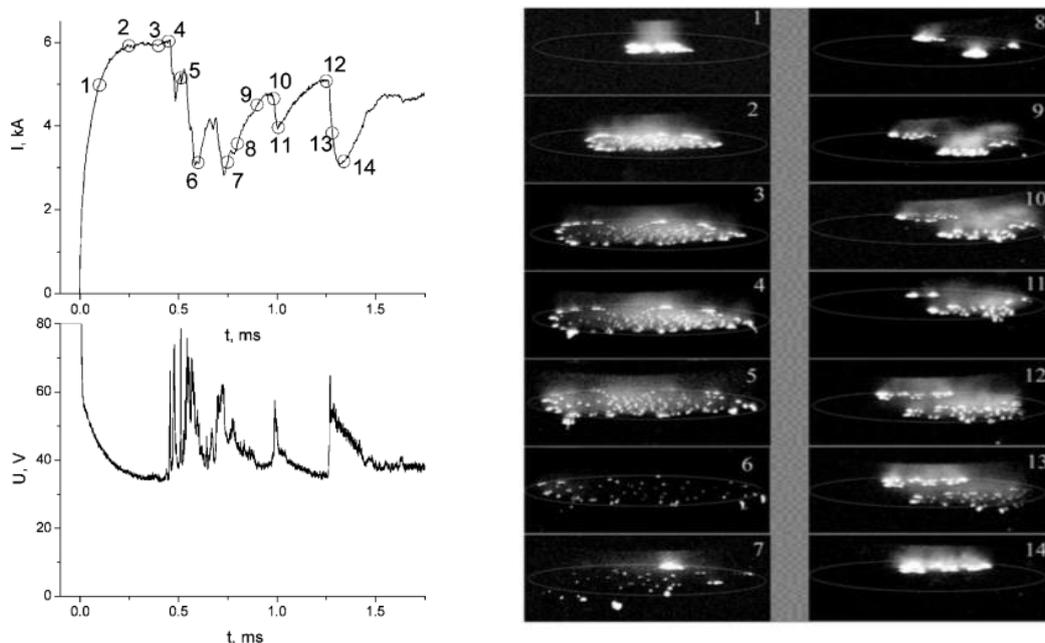


Рисунок 1.4. Сильноточная дуга на медь-хромовых электродах диаметром 30мм [19]. Зазор фиксирован ( $h=6\text{мм}$ ). Питание дуги прямоугольным импульсом  $I=6\text{кА}$ .

Слева – осциллограммы тока и напряжения. Справа – серия кадров съемки катода.

В [20] описан механизм возникновения анодного пятна. При уходе большого количества КП на боковую поверхности и смене знака анодного падения потенциала область анода оказывается неустойчивой относительно испарительно-ионизационных процессов. Если во время горения дуги на аноде имеется локальный перегрев, то в данной области активно будут происходить испарение материала анода и ионизация испарённых атомов. Это в свою очередь вызовет локальное увеличение концентрации плазмы. Положительное падение анодного потенциала (в отличие от нормального, отрицательного) приведет к увеличению плотности тока и, соответственно, потока энергии на парящий участок поверхности, который начнёт разогреваться еще сильнее и т.д. За очень короткое время дуга способна контрагировать у анода, возникнет анодное пятно. Такой режим горения дуги называют модой «анодной струи». Также в [20] было показано, что «дополнительным» поставщиком плазмы в промежуток (помимо КП), является анод. С поверхности анода происходит эмиссия атомов под действием первичных ионов, генерируемых КП. Средняя энергия в распределении вторичных атомов  $\sim 5\text{ эВ}$  (для медного анода).

Помимо «диффузной» моды и моды «анодной струи» выделяют также моды «интенсивной дуги» и «диффузного канала» [2]. В моде «интенсивной дуги» происходит контракция разряда на обоих электродах и сильные эрозионные поражения последних. В моде «диффузного канала» дуга также несколько контрагирована на обоих электродах, однако эрозионные поражения незначительные. Многочисленные исследования,

например [21, 22], позволили определить границы существования каждой из мод (Рисунок 1.5.). В дугах с изменяющимся межэлектродным зазором моды, в которых будет пребывать дуга, зависят от тока (амплитудного значения и величины, при котором произошел поджиг), скорости разведения контактов, размера электродов и используемого материала.

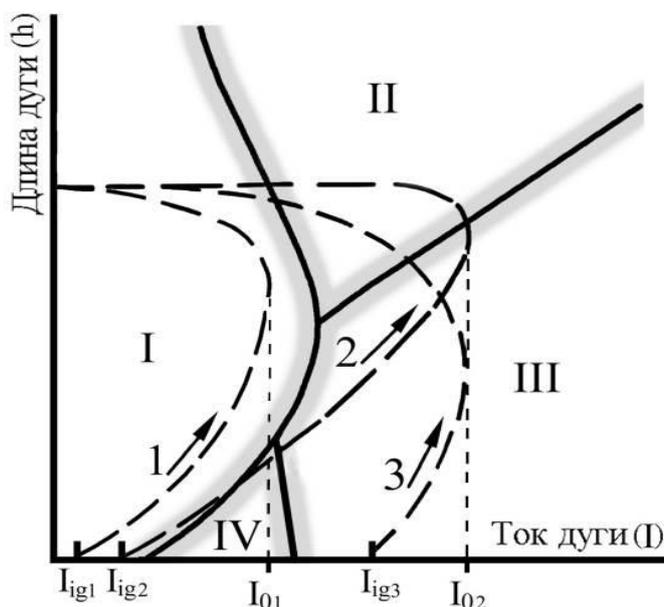


Рисунок 1.5. Моды СВД [2].

I — диффузная мода, II — анодная струя, III — интенсивная дуга, IV — диффузный канал.  
Штриховые кривые — «траектории дуги»;  
 $I_0$  — амплитудное значение тока;  $I_{ig}$  — значение тока в момент поджига разряда

Из диаграммы мод дуги видно, что в независимости от «траектории» дуга перед погасанием пребывает в диффузной моде. Однако после погасания дуги с током большой амплитуды (например, дуги, которая прошла по траекториям 2 или 3, Рисунок 1.5.), след контрагированной привязки не успеет остыть к нулю тока. Потому для успешной коммутации тока необходимо, чтобы с момента поджига и до погасания дуга существовала в диффузной моде. Для свободногорящей дуги область существования диффузной моды в КС с торцевыми электродами различных диаметров ограничена током  $\sim 10$  кА.

## 1.2. Стабилизированная аксиальным магнитным полем вакуумная дуга

Одним из способов предотвращения контракции дуги является воздействие на нее аксиальным магнитным полем (АМП). Первой работой, положившей начало исследованию воздействию магнитных полей на вакуумную дугу является [23]. Исследовалось воздействие внешнего однородного АМП на дуговой разряд, питающийся прямоугольным импульсом тока при фиксированном, достаточно большом зазоре. Результаты исследований показали,

что наложение АМП на дугу приводит к увеличению отключающей способности. Это объясняется тем, что АМП удерживает КП на рабочей поверхности электрода (Рисунок 1.6., справа), препятствуя боковым потерям плазмы. Действительно, ионный ток на экран при этом снижается с ростом индукции АМП (Рисунок 1.6., слева, кривая «с»), и растет критический для образования анодного пятна ток.

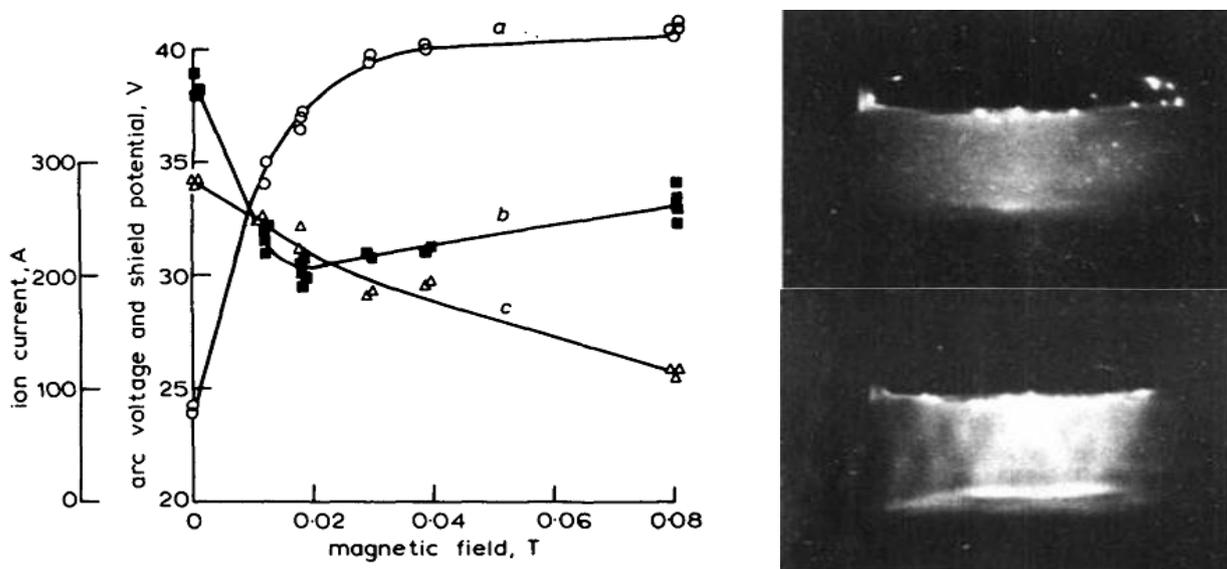


Рисунок 1.6. Вакуумная дуга, стабилизированная АМП [23]. Диаметр электродов 70 мм. Слева - зависимости характеристик разряда от индукции АМП ( $I=4.2$  кА,  $h=19$  мм) в развившейся дуге. а – потенциал «плавающего» экрана, b – напряжение дуги, с – ионный ток на экран под нулевым потенциалом.

Справа – кадры съемки дуги ( $I=3$  кА,  $h=28$  мм, катод сверху). Сверху –  $B=0$  Тл, снизу –  $B=0.04$  Тл.

Также в [23] было обнаружено, что зависимости напряжения на развившейся дуге при фиксированном токе от индукции АМП (т.н. вольт-тесловые характеристики, ВТХ) имеют V-образную форму и состоят из двух участков: падающего и растущего. В более поздних исследованиях [24] показано, что в действительности ВТХ имеют три участка: падающего, участка с практически неизменным напряжением и растущего участка. При этом выделяются два характерных значения индукции АМП:  $B_1$  и  $B_2$ , при которых, соответственно, стыкуются первый и второй, второй и третий участки. Значения  $B_1$  и  $B_2$  зависят от тока, диаметра и материала электродов (Рисунок 1.7., слева).

Первый участок характеризуется быстрым спадом напряжения и уменьшением уровня шумов на осциллограмме напряжения при увеличении  $B$ . Наличие шумов связано с присутствием большого количества КП на боковой поверхности катода (Рисунок 1.7., справа, а.). Резкий спад напряжения обусловлен тем, что АМП ограничивает возможность КП покидать рабочую поверхность катода, и уменьшает боковые потери ионов. Второй участок характеризуется слабо меняющимся напряжением с низким уровнем шумов.

Постоянство напряжения объясняется практически неизменным диаметром токовой привязки к катоду, и, как следствие, постоянством плотности тока. На данном участке привязка дуги к катоду занимает всю рабочую площадь электрода, а на боковой поверхности катода КП практически отсутствуют (Рисунок 1.7., справа, b). Для третьего участка характерен медленный рост напряжения ( $\sim V^{1/2}$ ) с низким уровнем шумов. На данном участке с ростом индукции АМП токовая привязка к катоду уменьшается в диаметре (Рисунок 1.7., справа, c), увеличивается плотность тока, что приводит к увеличению напряжения на дуге.

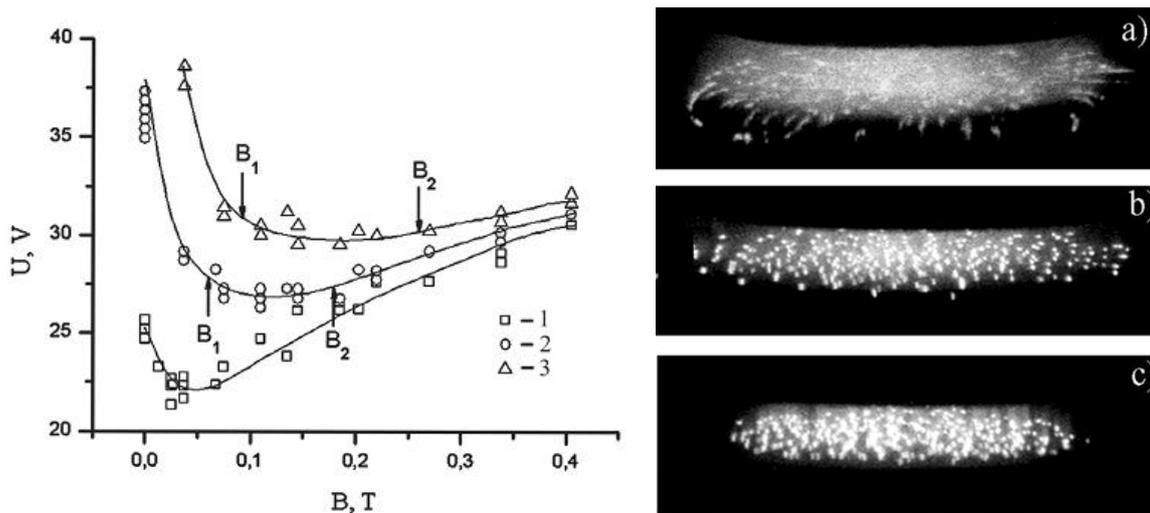


Рисунок 1.7. Вакуумная дуга на медь-хромовых электродах ( $D = 30$ мм,  $h=6$ мм), стабилизированная внешним АМП [24]. Слева – ВТХ, 1 –  $I=3.5$  кА; 2 — 7 кА; 3. — 11 кА. Стрелками отмечены значения  $B_1$  и  $B_2$ . Справа – кадры съёмки, катод снизу. а)  $V < B_1$ ; б)  $B_1 < V < B_2$ ; в)  $V > B_2$ .

Как говорилось во введении, в ВДК используются специальные АМП электроды, т.к. использование внешнего магнитного поля, генерируемого катушками, питание которых осуществляется от постороннего источника, не технологично. Конструкция АМП электродов обеспечивает поворот тока на угол порядка сотни градусов при его протекании через КС. Однако использование коммутируемого тока для создания АМП имеет недостатки. Один из них – сдвиг по фазе между коммутируемым током и аксиальной компонентой индукции поля. Обусловлен фазовый сдвиг индуцированными в электродных накладках вихревыми токами, которые препятствуют изменению магнитного потока. Для уменьшения вихревых токов в электродных накладках делают прорезы, что в свою очередь нарушает вращательную осевую симметрию поля в КС. Более того, генерируемое такими КС АМП в межэлектродном промежутке оказывается неоднородным.

В [25] исследовалась дуга в АМП-электродных КС (без прорезей) при наложении внешнего однородного АМП, что позволяло варьировать как величину АМП, так и его

форму (Рисунок 1.8.). Форма АМП определялась суперпозицией поля генерируемого КС и внешнего поля. Исследования проводились при фиксированном межэлектродном зазоре, дуга питалась прямоугольным импульсом тока.

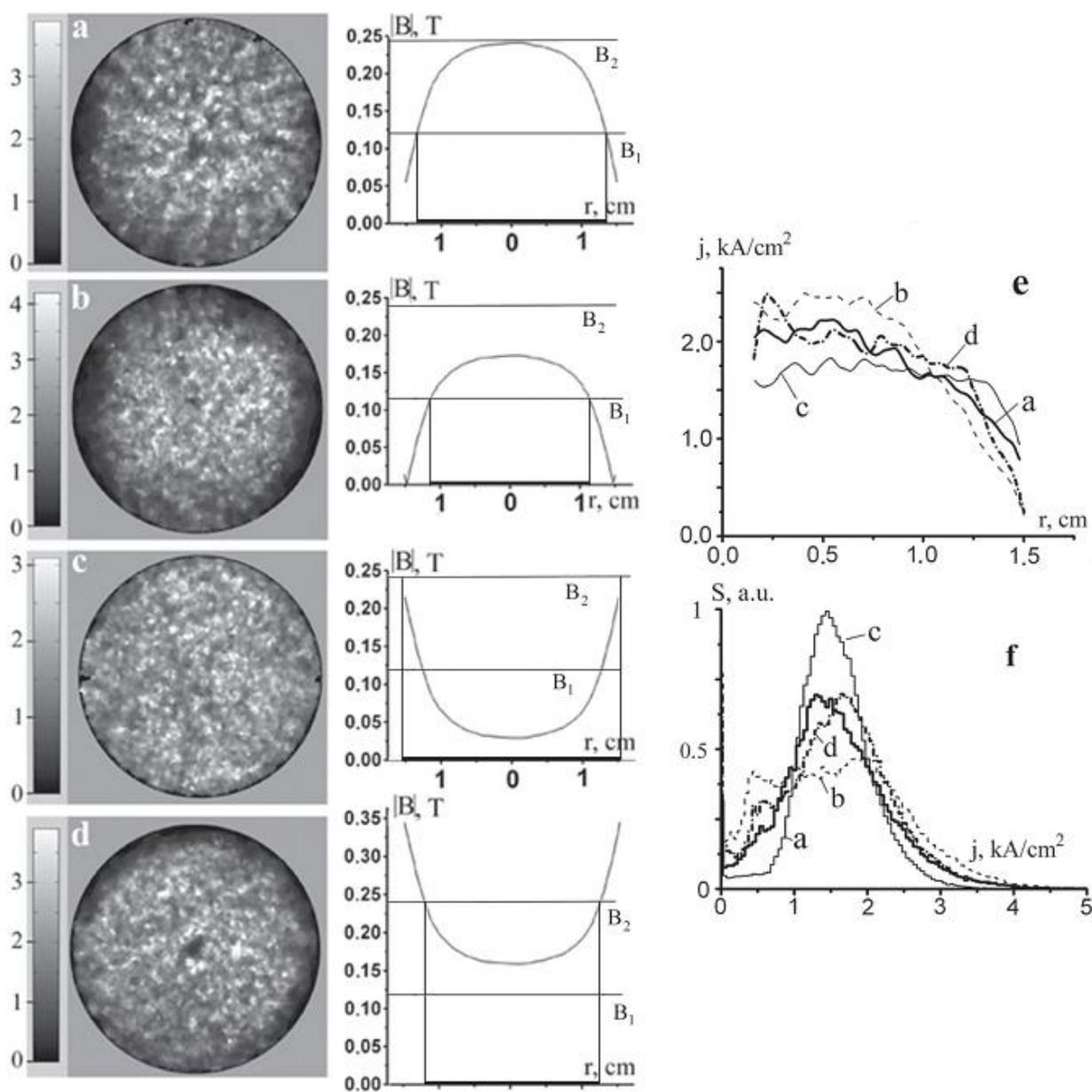


Рисунок 1.8. Квазистационарное состояние дуги в АМП КС со сплошными накладками ( $D=30\text{мм}$ ,  $h=4\text{мм}$ ,  $I=11\text{кА}$ ) [25]. а, б, с, д — результаты компьютерной обработки скоростного фотографирования поверхности катода. (шкала плотности тока в  $\text{kA}/\text{cm}^2$ ) и соответствующие распределения результирующего АМП (на горизонтальной оси чёрной линией отмечена область, в которой выполняется условие  $B_1 < B < B_2$  для АМП выпуклой формы и  $B < B_2$  для вогнутой). е — усреднённые по азимуту радиальные распределения тока на катоде, ф — гистограммы плотностей тока.

Было установлено, что в неоднородном АМП дуга стремится занять на катоде область, в которой индукция АМП удовлетворяет условию:  $B_1 < B < B_2$  – для АМП выпуклой формы и  $B < B_2$  – для АМП вогнутой формы. Данный результат кардинально

отличался от сложившегося на тот момент мнения, что дуга в квазистационарном состоянии стремится занять область с максимальной индукцией АМП.

Обратим внимание на случай с АМП вогнутой формы, представляющим из себя магнитный барьер с практически нулевым значением индукции внутри барьера (Рисунок 1.8., случай «с»). При таком АМП условие  $B < B_2$  выполняется практически на всем диаметре КС, а разряд наиболее равномерно распределен по поверхности катода. Анализ эрозионных поражений на аноде при воздействии такого поля говорит об успешном предотвращении контракции разряда (Рисунок 1.9.).

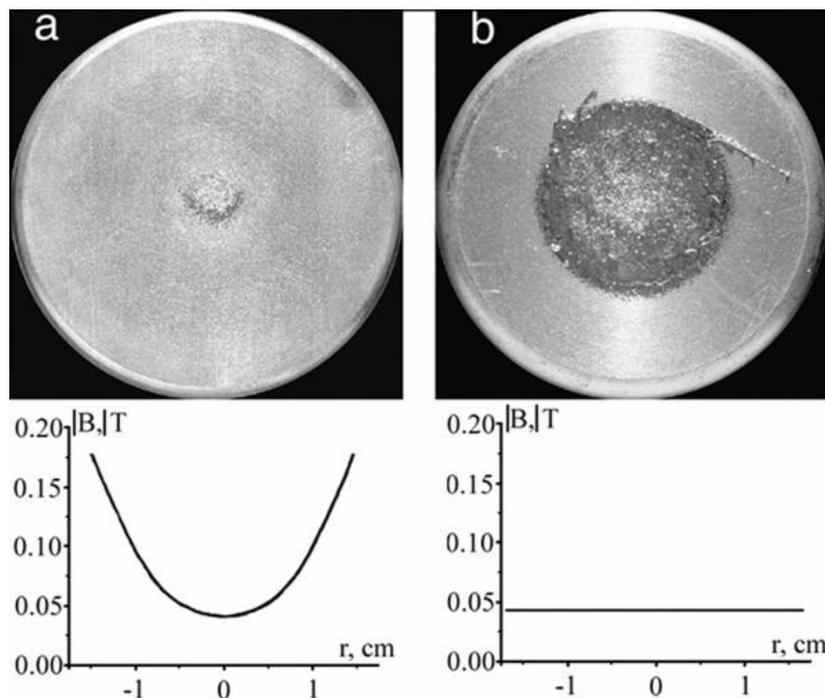


Рисунок 1.9. Сравнение эрозионных поражений анодов в дугах на медь-хромовых электродах [25] ( $I=11.5$  кА,  $D=30$ мм,  $h=4$ мм). Дуги стабилизировались а) – «магнитным барьером», б) – однородным АМП. Сверху – фотография анода после дугового воздействия, снизу – распределение АМП.

В работе [26] исследовалось поведение дуги в трех различных модификациях КС ТЕЛ диаметром 55 мм, отличающихся распределением генерируемого АМП (Рисунок 1.10., слева). Исследования проводились при фиксированном зазоре ( $h=4$ мм), дуга питалась импульсом постоянного тока. В работе было показано, что в каждой из КС в развившейся дуге нормированные на максимум радиальные распределения плотности тока не зависят от амплитуды тока. Для всех трех КС плотность тока резко падает на периферии электрода при значениях индукции АМП ниже уровня в 4 мТл/кА. Другими словами, дуга занимает область на контактах, охватываемую внешней изолинией приведенной индукции АМП в 4 мТл/кА. В работе было показано, что увеличение эффективной площади (области существования дуги) снижает значение плотности тока в приосевой области (Рисунок 1.10., справа), тем самым увеличивая отключающую способность контактной системы.

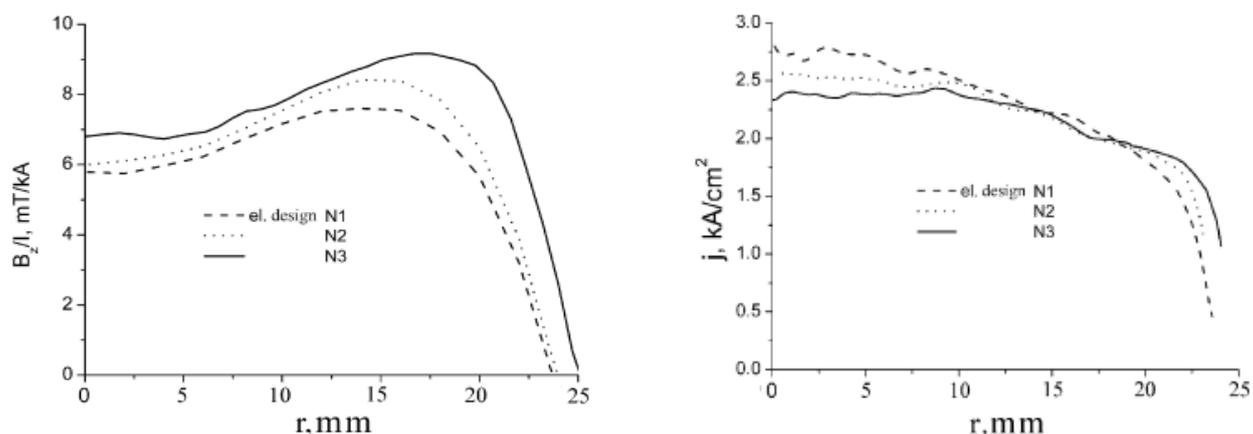


Рисунок 1.10. Сравнение радиальных распределений индукции АМП, генерируемых КС (слева) и радиальных распределений плотности тока на катоде в квазистационарном состоянии ( $I=35$  кА), усредненных по азимуту (справа) для трех вариаций КС [26].

### 1.3. Особенности поджига разряда в КС TEL

Выше были рассмотрены дуги на АМП электродах при фиксированном межэлектродном зазоре, питающиеся импульсом постоянного тока, инициированные вспомогательными поджигowymi устройствами. Предметом настоящих исследований является вакуумный разряд в меняющемся зазоре, поджигаемый в результате разрыва нагруженных током контактов. Поджиг разряда в таком случае происходит в результате перегрева и взрыва последней «точки» касания электродов [2]. В [27, 28] было показано, что на КС TEL возможен поджиг дуги как в одной, так и в нескольких точках. Возможность многоточечной инициации дуги объясняется конечным временем, необходимым для перетекания тока в «последнюю» точку касания.

В [28] было проведено детальное исследование влияния количества точек поджига на развитие разряда в КС TEL-50, TEL-55, TEL-64. Количество точек поджига определялось с помощью скоростной видеосъемки разряда с двух взаимно перпендикулярных направлений (съемка производилась перпендикулярно оси КС). Было выявлено, что вероятность одноточечного поджига снижается с увеличением тока в момент разрыва контактов и практически равна нулю при токах выше  $\sim 8\div 10$  кА. В работе была установлена связь вида осциллограмм напряжения с количеством точек поджига. Для одноточечного поджига характерно повышенное значение напряжения на первых миллисекундах после инициации разряда (Рисунок 1.11., зеленая кривая). При инициации разряда в двух и более точках осциллограммы напряжения практически не отличаются и характеризуются отсутствием повышенного напряжения на начальном временном интервале (Рисунок 1.11., синяя кривая). Так же в отдельный класс выносятся т.н. «однолепестковый» поджиг, который сначала ведет

себя как при многоточечном поджиге, а затем совершает некоторый скачек и приближается к кривой, характеризующей одноточечную инициацию (Рисунок 1.11., красная кривая). По анализу ВАХ и осциллограмм яркости излучения дуги в [30] было установлено, что разряд «забывает» историю поджига через 2.5-3.5 мс для КС TEL-50 и TEL-55 и через 4-5 мс для КС TEL-64. Пользуясь результатами [28] в настоящей работе по виду осциллограмм напряжения определяется количество точек поджига разряда.

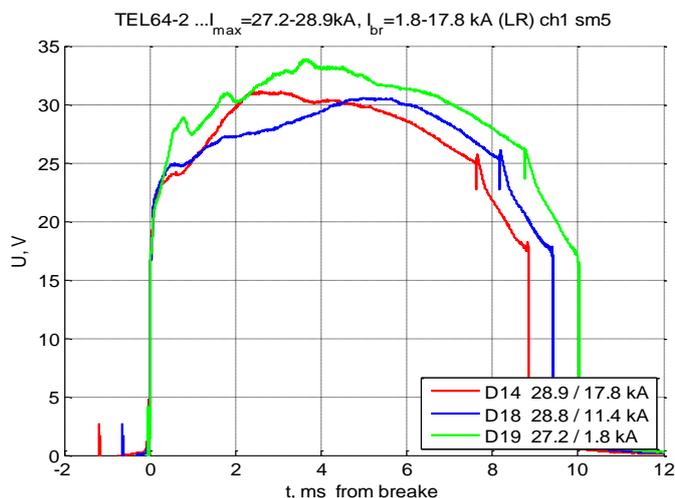


Рисунок 1.11. Осциллограммы напряжения КС TEL-64 ( $I_{ампл} \approx 28\text{ кА}$ ) [30]. В легенде указаны амплитуды импульсов тока и значение тока в момент возникновения дуги. Зеленая кривая – одноточечный поджиг, синяя кривая – многоточечный, красная – «однолепестковый» поджиг.

#### 1.4. Измерение температуры поверхности анода

Одной из первых известных работ по измерению температуры поверхности анода после погасания дуги является [29]. Исследования проводились на электродах ( $D=25\text{ мм}$ ,  $h=8-13\text{ мм}$ , свободногорящая дуга) из медь-хромовой композиции, питание дуги осуществлялось импульсом тока синусоидальной формы частотой 45 Гц. Температура определялась без пространственного разрешения. Тепловое излучение от анода регистрировалось одновременно на длинах волн (577 нм, 700 нм и 820 нм). Температура поверхности определялась из соотношений сигналов приемника на двух длинах волн (т.о. получались три значения температуры для трех комбинаций фильтров). В работе приводятся результаты измерений температуры (Рисунок 1.12.) для токов амплитудой в  $\sim 5\text{ кА}$  и  $\sim 7\text{ кА}$  (реализуется режим с «развитым» анодным пятном).

При амплитуде тока в 5 кА ( $j_{cp} \approx 1\text{ кА/см}^2$  – средняя по электроду плотность тока в максимуме тока) максимальная температура в нуле тока была порядка  $\sim 1750\text{ К}$  и спадала до  $\sim 1400\text{ К}$  за 4 мс. Авторы предполагают наличие плато на кривых остывания при температуре  $\sim 1575\text{ К}$  (Рисунок 1.12., слева). В режиме с развитым анодным пятном

( $j_{cp} \approx 1.42 \text{ кА/см}^2$ ) в нуле тока максимум температуры достигает  $\sim 2500 \text{ К}$  и спадает до  $\sim 1400 \text{ К}$  приблизительно за 3 мс. Также в работе приведены результаты измерения температуры, определенные по значениям токов термоэлектронной эмиссии с поверхности анода. Показано, что результаты измерений двумя способами хорошо согласуются.

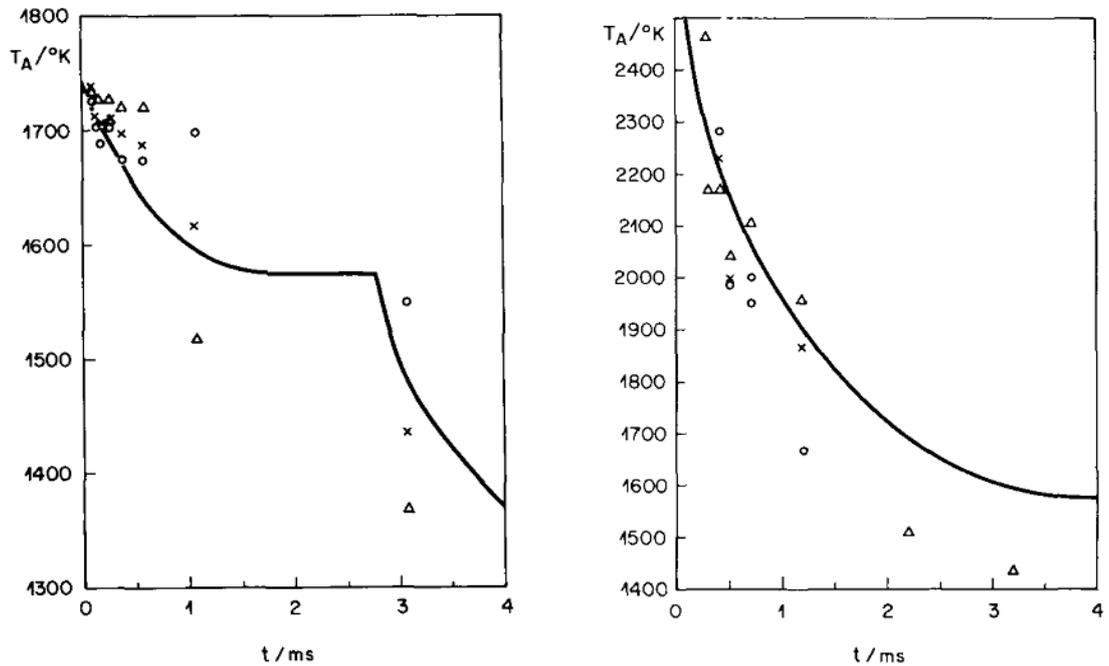


Рисунок 1.12. Температура поверхности анода после нуля синусоидального тока [31]. Слева – амплитуда тока равна 5 кА, справа – 7 кА. Температура поверхности определялась из соотношений сигналов приемника на двух длинах волн. Крестики –  $I(577\text{нм})/I(820\text{нм})$ , кружки –  $I(577\text{нм})/I(700\text{нм})$ , треугольники –  $I(820\text{нм})/I(700\text{нм})$ .

К наиболее ранним работам также относятся [8, 9, 30]. (Все три работы, по-видимому, выполнялись одной научной группой при Toshiba Corporation, Япония). Измерения температуры проводились двухцветным пирометром на длинах волн 850 нм и 1000 нм. В работах исследовались электроды с накладками из медь-хромовой композиции.

В [8] исследуются электроды двух типов - АМП и торцевые во внешнем поле (отсутствует информация о диаметре электродов) при синусоидальной форме тока частотой  $\sim 45 \text{ Гц}$ . Для обоих типов электродов температура после погасания разряда (при максимальном отключаемом токе) одинакова и составляет 1750 К. В [30] максимальная температура при предельных отключаемых токах составляет 2050 К. Видим, что значения температур разнятся на 300 К. Измерения температуры в [8, 30] проводятся без пространственного разрешения в приосевой части анода.

В [9] приводятся пространственные распределения температуры по поверхности анода, получаемые с помощью высокоскоростной видеокамеры. Калибровка камеры осуществлялась с помощью двухцветного пирометра. Диаметр электродов составлял

$D = 45\text{мм}$ , питание дуги осуществлялось синусоидальным импульсом тока частотой  $\sim 45\text{ Гц}$  и амплитудой тока  $I_{\text{амп}} \approx 34\text{ кА}$  ( $j_{\text{ср}} \approx 2.1\text{ кА/см}^2$ ), разряд стабилизировался внешним АМП – слабым (Рисунок 1.13., сверху) и сильным (Рисунок 1.13., снизу).

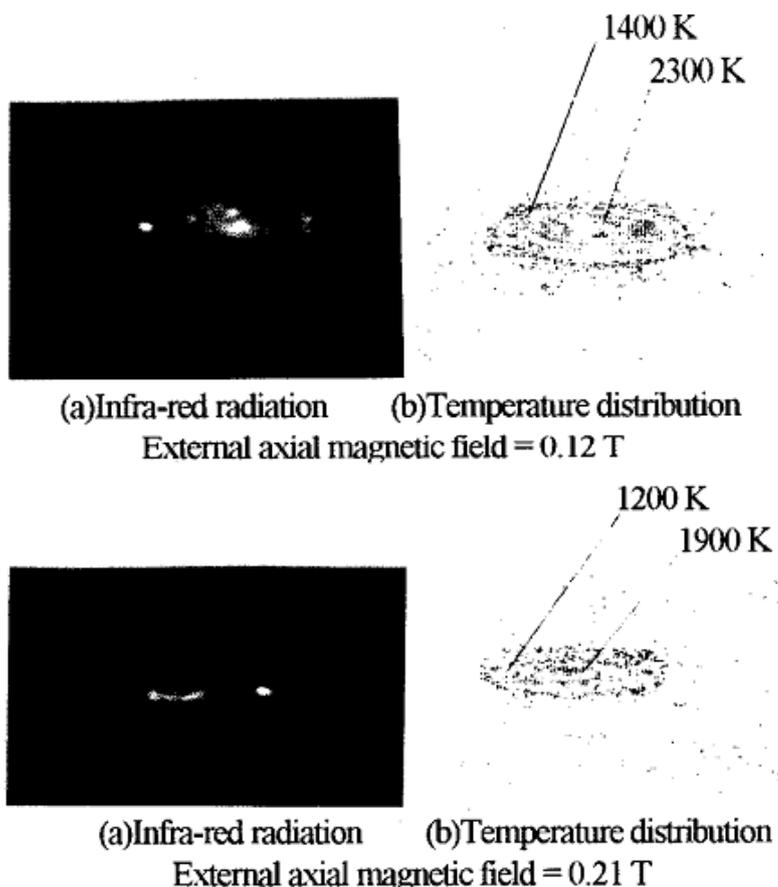


Рисунок 1.13. Температура анода в нуле тока ( $I_{\text{амп}} \approx 34\text{ кА}$ ) [9]. Электроды из медь-хрома ( $D = 45\text{ мм}$ ). Слева – инфракрасное излучение, регистрируемое камерой. Справа – результат обработки поля температур. Сверху – стабилизация слабым АМП (0,12 Тл), снизу – сильным АМП (0,21 Тл).

Для обоих случаев температура в приосевой области превосходит температуру на периферии контакта более чем на  $\sim 700\text{ К}$ . При наложении на дугу слабого АМП температура в центральной части анода составляет порядка  $\sim 2300\text{ К}$ , а при стабилизации более сильным АМП оказывается ниже и составляет  $\sim 1900\text{ К}$ .

В более поздних работах [5, 6] той же научной группы приводятся отличающиеся между собой результаты, полученные в одинаковых условиях: АМП-электроды диаметром 42 мм с накладкой из  $\text{AgWC}$ , ток синусоидальной формы частотой 60 Гц амплитудой  $I_{\text{амп}} \approx 20\text{ кА}$  ( $j_{\text{ср}} \approx 1,45\text{ кА/см}^2$ ). Температура анода измеряется пирометром без пространственного разрешения. В [5] температура анода в нуле тока составляет  $\sim 2470\text{ К}$ , а в [6]  $\sim 1720\text{ К}$ . В данных двух работах твердо установлено наличие плато на кривых остывания анода из разных материалов, включая и медь-хромовую композицию (однако приводятся

временные зависимости только для AgWC). Это плато образуется при температурах между 1350 К и 1400 К. Они связывают его с процессом солидификации расплава на аноде (температура плавления меди составляет 1356 К). В [6] проводится сравнение различных материалов накладок (AgWC, Cu, CuCr и CuCrMo) с точки зрения пробы при приложении ПВН. Авторы приходят к выводу о высокой роли в пробе мелких частиц (капель), образовавшихся в процессе горения дуги. Механизм формирования капель и их температуру в работе не исследовали. Также отмечается, что в исследуемых режимах капель при использовании накладок из CuCr не наблюдалось.

Плато, приходящееся на 1370 К, наблюдали в [31]. Измерения проводились с помощью пирометра без пространственного разрешения. Питание дуги осуществлялось импульсом тока синусоидальной формы частотой 50 Гц при наложении внешнего АМП. Исследовались достаточно длинные дуги (финальный зазор порядка 24 см), в которых имело место сильное сужение дугового канала к аноду в результате пинч-эффекта. Сравнивались в одинаковых условиях аноды из медь-хрома с содержанием хрома в различных пропорциях (Cu75Cr25 и Cu50Cr50). В работе было показано, что длительность стадии затвердевания расплава (длительность наличия плато) при использовании композиции с меньшим содержанием хрома оказывается меньше (при одинаковых амплитудах тока). При использовании анода диаметром 60 мм максимальная температура в нуле тока составляет порядка  $\sim 1550-1650$  К при  $I_{амп} \approx 12$  кА ( $j_{ср} \approx 0,45$  кА/см<sup>2</sup>, однако дуга длинная и контрагирована у анода).

В [10] исследуются АМП контактные системы с различными диаметрами и максимальными отключаемыми токами (электроды из медь-хрома), токовая нагрузка – половина периода синуса частотой 50 Гц. Температуры измеряются как локально пирометром, так и с пространственным разрешением с помощью высокоскоростной видео камеры. В работе авторами была измерена излучательная способность медь-хромовой композиции  $\varepsilon_{CuCr} = 0.63 \pm 0.15$  на длине волны 1 мкм при температурах 770-1370 К. Полученное значение весьма странно (ведь  $\varepsilon_{Cu} \approx 0.03$ , а  $\varepsilon_{Cr} \approx 0.41$  при выполняемых в работе условиях) и трактуется авторами невнятно. Авторами наблюдается неоднородное распределение температуры анода в нуле тока. Однако отмечается, что в контактной системе малого диаметра максимальная и минимальная температура отличаются не сильно (в то время как по оценкам распределения плотности тока ожидался сильный перегрев в приосевой области анода). Данное обстоятельство авторы связывают с перемещением жидкого расплава из центральной части электрода на периферию. Максимальная

температура по поверхности анода для всех исследуемых контактных систем растет практически линейно с ростом амплитуды тока (Рисунок 1.14.).

Для контактных систем «3» и «6» (см. легенду к «Рисунок 1.14.») значения максимальных температур при предельных отключаемых токах ( $j_{cp} \approx 2.2 \text{ кА/см}^2$  для «geo\_6» и  $j_{cp} \approx 2.7 \text{ кА/см}^2$  для «geo\_3») составляют порядка  $\sim 2300 \text{ К}$ . Для КС меньшего диаметра предел отключаемых токов достигается при максимальных температурах поверхности в  $\sim 1800 \text{ К}$ . Также в работе утверждается, что в экспериментах ни разу не наблюдалось в процессе остывания температурное плато. Авторы объясняют это тем, что по их мнению солидификация композиции меди с хромом происходит в широком температурном интервале от  $1356 \text{ К}$  до  $1673 \text{ К}$ .

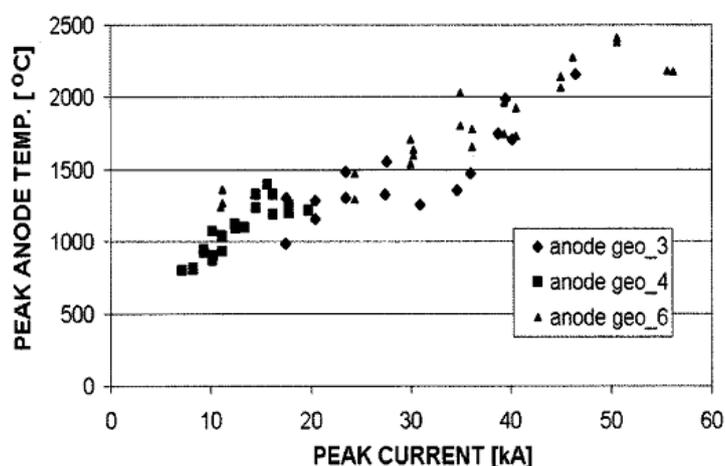


Рисунок 1.14. Максимальная температура поверхности анода для 3х различных АМП контактных систем [10]. Предельные отключаемые токи и диаметры КС: геометрия «geo\_3»:  $I_{lim} \approx 45 \text{ кА}$ ,  $D = 46 \text{ мм}$ , геометрия «geo\_4»:  $I_{lim} \approx 20 \text{ кА}$ ,  $D = 32 \text{ мм}$ , геометрия «geo\_6»:  $I_{lim} \approx 45 \text{ кА}$ ,  $D = 51 \text{ мм}$ .

В [7] исследуются контакты торцевого типа с накладками из медь-хрома. В работе были измерены излучательная способность медь-хромовой композиции на четырех различных длинах волн при температуре  $1373 \text{ К}$ . Измерения температур проводились с помощью высокоскоростной камеры. Питание дуги осуществляется током синусоидальной формы частотой  $50 \text{ Гц}$  при фиксированном зазоре. Исследовались свободногорящие дуги и дуги, стабилизированные АМП ( $B = 7 \text{ мТл/кА}$ ). При минимальных рассматриваемых токах ( $I_{амп} \approx 8 \text{ кА}$ ,  $j_{cp} \approx 2.55 \text{ кА/см}^2$ ) максимум температуры составляет  $\sim 1600 \text{ К}$  в свободногорящей дуге (Рисунок 1.15., слева) и  $1200$  в стабилизированной АМП. Примерно в таких же режимах (с близкими плотностями токов, дуга стабилизирована АМП) в [10] получаемые максимальные значения температур составляли  $\sim 2300 \text{ К}$ , что на  $\sim 900 \text{ К}$  больше чем в [7]. Не смотря на то, что, Н. Schellekens является соавтором и данной работы и [10], результаты двух работ в [7] не сравниваются.

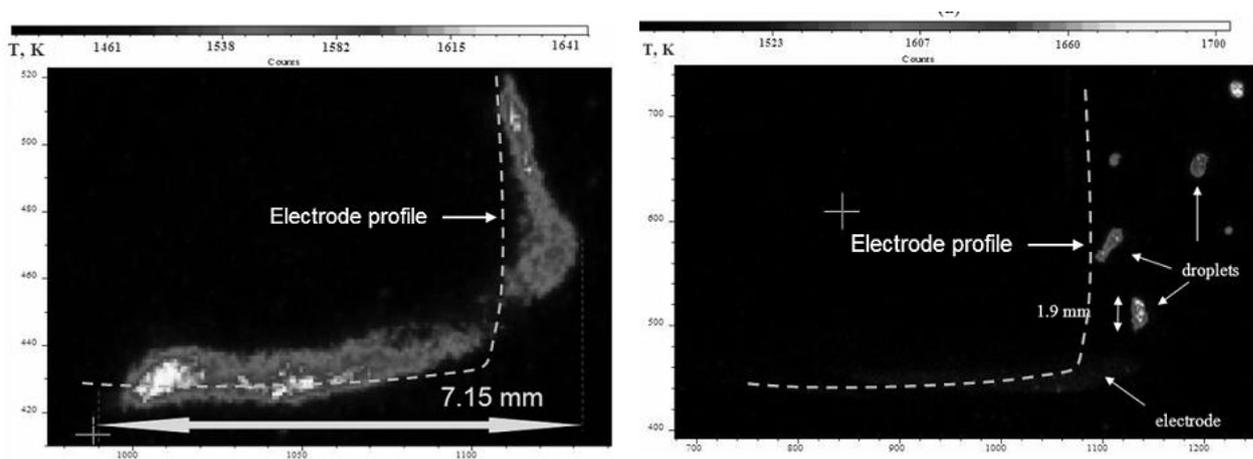


Рисунок 1.15. Распределение температуры по поверхности анода ( $D=20$  мм) после погасания дуги [7]. Фотографирование анода проводится сбоку. Слева – свободногорящая дуга ( $I_{амп} \approx 8$  кА), справа – стабилизированная АМП ( $B=7$  мТл/кА,  $I_{амп} \approx 15$  кА). При наибольших исследуемых токах ( $I_{амп} \approx 15$  кА,  $j_{ср} \approx 4.8$  кА/см<sup>2</sup>) максимальные значения температур в нуле тока достигают значений всего в  $\sim 1800$  К для свободногорящей дуги и  $\sim 1500$  К для стабилизированной АМП. Также в работе были определены температуры капель. Температура наиболее разогретых частей капель в [7] составляла  $\sim 1750$  К (Рисунок 1.15., справа).

Опубликованными в последние годы работы, посвященные измерению температуры поверхности анода, являются [32, 33]. В [32] измерялась температура анодного пятна на ТМП контактах в процессе горения дуги. Исследовались электроды из медь-хромовой композиции, дуга инициировалась разрывом электродов при питании током синусоидальной формы частотой 50 Гц ( $I_{амп} \approx 29$  кА). Измерения проводились с помощью высокоскоростной камеры с использованием оптического фильтра с диапазоном пропускания 1.5 мкм – 1.7 мкм. В работе описан способ измерения излучательной способности поверхности металлов. Была определена излучательная способность чистой меди при температуре плавления в жидком и твердом состоянии. Однако коэффициент серости для медь-хромовой композиции авторы заимствуют из стороннего источника ( $\epsilon_{CuCr}=0.3$  при  $\lambda = 1.5 \div 1.7$  мкм [34]). Авторы в работе делают допущение о том, что при измерениях температуры во время горения дуги регистрируется только тепловое излучение нагретой поверхности, а дополнительными источниками излучения (в частности излучением дуги) можно пренебречь. Полученное максимальное значение температуры анодного пятна в процессе его нагрева составляет  $\sim 2650$  К, а через 0.5 мс после начала охлаждения температура анодного пятна падает до 2118 К.

В [33] исследуются электроды торцевого типа с накладками из медь-хрома ( $D = 38$  мм) во внешнем АМП. Форма питающего дугу тока – первый полупериод синуса частотой 50 Гц. Измерения проводятся без пространственного разрешения двумя способами: пирометром, и с помощью спектрографа (как в дуге, так и после ее погасания). Регистрируемые спектральные кривые в дуге разделяют на линейчатый спектр (что соответствует излучению дуги) и сплошной (который соответствует планковской кривой интенсивности излучения поверхности тела). Температура поверхности определяется из сплошного спектра. При стабилизации дуги внешним АМП ( $B_z = 180$  мТл) температура в центральной части анода после погасания разряда составляла  $\sim 1300$  К при  $I_{амп} \approx 15$  кА ( $j_{ср} \approx 1.3$  кА/см<sup>2</sup>) и  $\sim 1600$  К при амплитуде тока в  $I_{амп} \approx 20$  кА ( $j_{ср} \approx 1.75$  кА/см<sup>2</sup>).

**Выводы.** Выше были приведены результаты известных на сегодняшний день работ, посвященных измерению температуры анода в сильноточной вакуумной дуге. Большая часть работ (при том, что их общее количество не велико, порядка десятка) была проведена без пространственного разрешения. Эксперименты в описанных выше работах проводились в сильно различающихся условиях, что затрудняет анализ полученных результатов. Тем не менее, в экспериментах при схожих условиях (при близких средних плотностях тока) результаты сильно разнятся (даже в работах одних авторов). Например, различия в максимальных температурах непосредственно в нуле тока могут отличаться на 500-700 К. В рассмотренных работах часто говорится о каплях и их важной роли при восстановлении электропрочности промежутка, однако определены температуры капель были только в одной работе. Проведенный литературный обзор подчеркивает **актуальность темы диссертационной работы.**

### 1.5. Пробой промежутка восстанавливаемым напряжением

Восстановление электрической прочности промежутка после погасания вакуумной дуги – сложное явление, в котором в определённых условиях играют роль также и процессы на катоде [35, 36]. В данных работах исследовались свободногорящие дуги на электродах торцевого типа.

Согласно [36] пробой промежутка после приложения ПВН следует разделить на пробои, происходящие непосредственно после нуля тока, и затянутые пробои, происходящие через время  $\sim$ мс и более, поскольку они вызваны различными физическими процессами.

Согласно [36] пробой промежутка непосредственно после нуля тока на переднем фронте импульса ПВН – это таунсендовские пробои в соответствии с левой ветвью кривой

Пашена для пара, источником которого являются перегретые электроды.

В [35,36] считается установленным, что пробой происходит, если интеграл  $(n*d) = \int_0^d n(z) dz$  превосходит некоторое критическое значение  $(n*d)_{crit}$  ( $n(z)$  – концентрация паров материала электродов,  $d$  – длина межэлектродного промежутка). Для медь-хромовых электродов критическое значение  $(n*d)_{crit}$  составляет  $\sim 3*10^{19} \text{ м}^{-2}$ . При длине межэлектродного промежутка  $\sim 1$  см этому значению соответствует концентрация насыщенного металлического пара  $3*10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Такая концентрация достигается при температуре медь-хромовых контактов  $\approx 2000$  К. При этом имеется в виду, что на аноде до такой температуры разогрета значительная часть поверхности анода, имеющая характерный размер, превосходящий межэлектродное расстояние.

Остаточная плазма способствует пробую, но её роль вторична. Фактически она сводится к обеспечению первичных зарядов для развития процесса пробоя. Более сильный разогрев электродов и, соответственно, более высокая концентрация пара при нуле тока обеспечивают стопроцентную вероятность пробоя, который в этом случае называют “thermal re-ignition” [36].

Если концентрация паров заметно ниже критической, то пробой может произойти с некоторой задержкой ( $\sim$ мс). Затянутые пробой наиболее характерны для медных электродов. Важную роль в возникновении пробоя в таких условиях играют поверхностные явления. Чем ниже концентрация паров, тем существеннее роль явлений на поверхности расплавленных электродов.

Результаты [35,36] показали, что после горения дуги в интенсивной моде, на расплавленных поверхностях электродов образуются волнообразные структуры. При этом возможно формирование рельефных выступов и отрыв от них капель. Капли имеют относительно небольшие скорости и потому долго ( $\sim$ мс и более) остаются в промежутке. Отмечается, что особенно сильно возмущена поверхность медных электродов и, соответственно, велико образование капель. Размер капель, оторвавшихся от анода, больше (вплоть до мм), чем капель, оторвавшихся с катода.

Медь-хромовые электроды, в отличие от медных, генерируют значительно меньше капель. При этом электродами вовсе не генерируются капли размером  $> 30$  мкм. Роль капель в процессе пробоя предполагается в том, что испарение с них увеличивает концентрацию пара в промежутке, однако в случае медь-хромовых электродов, учитывая небольшую скорость генерации капель и их малый размер, они не играют существенной роли в создании условий для пробоя промежутка [36].

Для медных контактов было обнаружено, что если высокое напряжение на контактах сохраняется достаточно долгое время, пробой могут быть спровоцированы образующимися в сильных полях выступами жидкого металла в виде бугорков с тонким кончиком [35]. Необходимо отметить, что на электродах медь-хромовой композиции образование таких структур авторами [35, 36] не наблюдалось. По их мнению, на CuCr электродах это явление не может проявиться, т.к. при температурах  $<1950$  К начинается солидификация смеси жидкого хрома и меди, что влечёт за собой разделение фаз и образование мелких зерен хрома ( $\sim 1$  мкм), которые сильно увеличивают вязкость расплава.

По результатам испытаний в ПГ «Таврида Электрик», при протекании токов близких к предельным отключаемым пробой с большой вероятностью (60%–70%) происходят в первые 100 мкс после приложения ПВН. Т.е. эти пробои, согласно изложенному выше обзору, должны быть обусловлены наличием на поверхности анода значительных по размеру (превосходящих межэлектродный промежуток  $\sim 1$  см) областей с температурой не менее 2000 К.

## 2. Техника и методика эксперимента

### 2.1. Экспериментальная установка

Исследования дуговых процессов в настоящей работе проводились на той же экспериментальной установке, что и в [28], (поэтому описание силовой части установки частично повторяет описание экспериментальной установки в [28]; отличием, например, является оптический столик, который был изготовлен для установки видеокамеры для фотографирования анода на двух длинах волн). Блок-схема установки представлена ниже (Рисунок 2.1.). Измерения проводились в разборной вакуумной камере из нержавеющей стали при непрерывной откачке турбомолекулярным насосом (достигалось давление не более чем  $10^{-4}$  Па). Камера оснащена окнами для наблюдений из кварцевого стекла. Внутри камеры расположены исследуемые электроды – неподвижный анод (вверху) и подвижный катод (внизу).

Напряжение на электродах измерялось цифровым осциллографом Agilent DSO5014A с использованием дифференциального пробника N2772A. Напряжение на дуге определялось путем измерения напряжения на хвостовиках электродов и вычитания падения напряжения в теле контактов (активная и индуктивная составляющие). Синхронизация источника питания главной цепи, привода и измерительной аппаратуры осуществлялось центральным пультом управления.

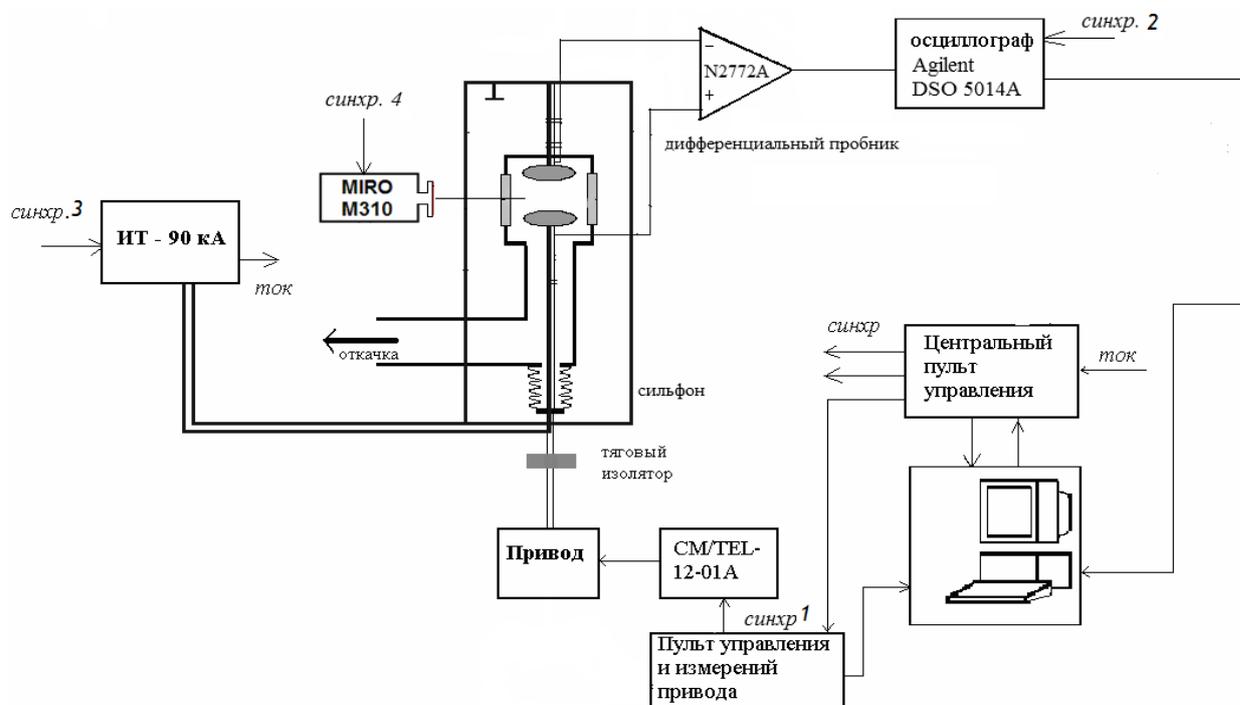


Рисунок 2.1. Блок-схема экспериментальной установки. Схема взята из [28].

Разряд питался импульсами тока, близкими по форме к первому полупериоду синуса частотой 50 Гц. Питание осуществлялось источником тока ИТ90кА (Рисунок 2.2.). Основная часть импульса формировалась LC цепью, состоящей из пяти ячеек батареи (L1-C1...L5-C5) и двух регулируемых индуктивностей: фронта (ИФ) L6 и спада (ИС) – L7. Формирование спада до нуля тока осуществлялось с помощью обводной цепи (тиристор T2, и цепь L8,R3).

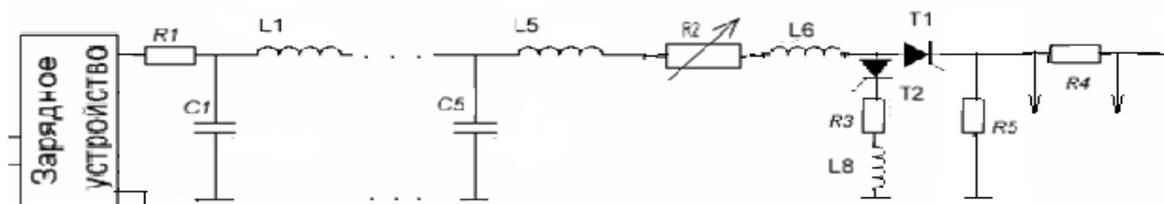


Рисунок 2.2. Упрощенная схема источника тока. Схема взята из [28].

Дуга инициировалась разрывом нагруженных током контактов. Исследовались АМП контакты различного диаметра (50 мм, 55 мм и 64 мм) с накладками из CuCr70/30. В работе использовался привод, обеспечивающий динамику близкую к серийному ВВ для среднего класса напряжений. Скорость подвижного контакта  $\sim 1$  м/с, финальный зазор 6 мм. Разрыв контактов осуществлялся после  $\sim 1$  мс после начала токового воздействия. Время горения дуги в таком случае составляло  $\sim 9$  мс.

Ниже (Рисунок 2.3.) приведён пример осциллограмм импульса с многоточечным поджигом в КС TEL-64.

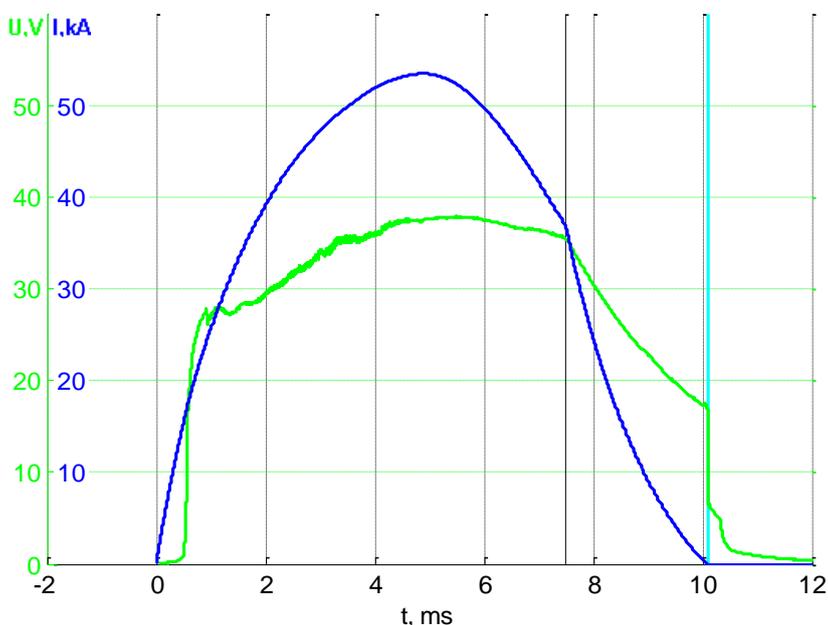


Рисунок 2.3. Примеры осциллограмм тока (синяя) и напряжения (зелёная). Амплитудное значение тока  $I = 53,4$  кА, ток, при котором произошёл разрыв контактов  $I_p = 18,1$  кА. Поджиг многоточечный. Черной вертикальной линией отмечен момент включения тиристора сброса.

Как говорилось ранее, на поверхности катода могут существовать катодные пятна двух сортов: первого рода и второго рода. Промышленные ВДК перед эксплуатацией, как правило, подвергаются кондиционированию, в т.ч. дугой, что приводит к удалению диэлектрических включений с поверхности электродов и к горению КП второго рода. Поэтому, в ходе настоящих исследований после установки свежих электродов в вакуумную камеру, а также после вскрытия камеры, электроды проходили процедуру «чистки»: подавалась серия из десятка импульсов, амплитуду которых постепенно увеличивали с ~5 до ~20 кА. Чистящие импульсы не приводили к сильным эрозионным поражениям электродов. После чистящих импульсов наблюдались незначительные оплавления небольших участков на периферии электродов (оплавились области, в которых происходил поджиг разряда)

Для регистрации теплового излучения с поверхности анода и съемки дуги использовалась высокоскоростная видеокамера Phantom MIRO M310 с макрообъективом Carl Zeiss 100/2. Основные технические характеристики камеры: производительность – 3.2 Гпикс/с; формат матрицы 1280x800, минимальное время экспозиции – 1 мкс, разрядность – 12 бит, сенсор – черно-белый, чувствительный в диапазоне 350-1100 нм (наибольшая чувствительность приходится на диапазон 550-800 нм).

## 2.2. Измерение температуры анода

**Основная идея.** Температура анода определялась по яркости его теплового излучения (характеристики теплового излучения описаны в приложении 1). Данная задача решалась путём сравнения отсчёта, выданного приёмником излучения от исследуемого источника, с отсчётом от калиброванного источника, помещённого в то самое место, где в экспериментах находился исследуемый источник. Расположение исследуемого и эталонного источников в одном и том же месте обеспечивало возможность количественного сравнения яркостей излучений, т.к. каждым пикселом камеры регистрировались излучения каждого из источников, испускаемые в одинаковый телесный угол. В настоящей работе приёмником излучения являлась высокоскоростная видеокамера Phantom MIRO M310.

В качестве калиброванного источника в работе использовалась т.н. банд-лампа (вакуумированный баллон с накаливаемой от стабилизированного источника тока вольфрамовой полосой). Фотографирование анода проводилось под небольшим углом к нормали поверхности  $\sim 10^0$ . Камера фиксировала весь цикл горения дуги, начиная от поджига, и продолжала работу после погасания дуги в течение  $10 \div 30$  мс, что позволяло анализировать остывание анода после окончания протекания тока. Момент прекращения

тока можно было установить при покадровом просмотре заснятого видео: в нуле тока происходило резкое уменьшение яркости изображения.

### 2.2.1. Коэффициент излучения композиции CuCr

Для того чтобы из яркости излучения поверхности анода получить истинную температуру, необходимо знать коэффициент излучения медь-хромовой композиции. Нам известно всего три работы (были представлены в обзоре литературы), в которых определялось значение для CuCr. В [10] измерения сделаны на одной длине волны  $\lambda = 1$  мкм ( $\epsilon_\lambda = 0.63 \pm 0.15$ ). В [7] измерения сделаны на четырёх различных длинах волн (Таблица 1.) при температуре 1373К. Полученные значения достаточно близки к эмиссионным свойствам вольфрама при сравнительно близкой температуре (1600 К). Погрешность определения  $\epsilon_\lambda$  в [7] не указана, также зависимость  $\epsilon_\lambda$  от температуры не анализировалась.

Таблица 1. Сравнение коэффициентов эмиссии CuCr и W.

$\lambda$ , мкм	0,6	0,7	0,775	0,825
$\epsilon_{\lambda, \text{CuCr}}$ (T=1373 К) [7]	0,45	0,45	0,42	0,41
$\epsilon_{\lambda, \text{W}}$ (T=1600 К) [37]	0,46	0,44	0,43	0,42

Расхождения в результатах работ [7] и [10] значительные. Неожиданно большое значение  $\epsilon_\lambda = 0.63$  (особенно неожиданно, что это значение получено при достаточно большом значении длины волны, при котором у всех чистых металлов  $\epsilon_\lambda$  заметно уменьшается), полученное в [10], комментируется авторами невнятно. В [32, 34] приводится значение коэффициента эмиссии медь-хрома на длинах волн, лежащих вне диапазона чувствительности нашей камеры ( $\epsilon_{\text{CuCr}} = 0.3$ ,  $\lambda = 1.5 \div 1.7$  мкм). Заметим, что вольфрам имеет близкое значение  $\epsilon_\lambda \approx 0.27$  в данном спектральном диапазоне при температурах 1600-2600 К. Таким образом, видим, что информация об эмиссионных свойствах CuCr минимальна. Для определения температуры анода можно действовать несколькими способами. Измерять температуру можно путем фотографирования:

1. во всем спектральном диапазоне чувствительности камеры.
2. в узких спектральных интервалах (с использованием интерференционного фильтра – ИФ).
3. через два ИФ (на двух различных длинах волн).

### 2.2.2. Прямая съемка анода

**Первый способ.** Т.к. результаты измерения  $\varepsilon_\lambda$  для CuCr [7, 32, 34] не сильно отличаются от  $\varepsilon_\lambda$  для W, то можно сделать предположение о том, что коэффициент эмиссии CuCr и его спектральная зависимость ровно такие, как у вольфрама и проводить измерения во всем спектральном диапазоне (ограниченном чувствительностью камеры). Т.е. можно получать распределение температуры поверхности анода, сопоставляя отсчёты, полученные при фотографировании банд-лампы при различных температурах, с отсчётами, полученными от разных областей анода при его фотографировании. Плюсом данного способа является достаточно высокий уровень сигнала (т.к. съемка ведется в широком диапазоне длин волн). Можно ожидать возможность измерения сравнительно небольших температур. Недостатком, все же, является неопределенность коэффициента эмиссии медь-хромовой композиции в широком диапазоне длин волн. Этот способ можно использовать для относительных измерений.

**Второй способ** заключается в проведении измерений температуры в узких спектральных интервалах (используя интерференционные фильтры). При использовании интерференционного фильтра сильно уменьшается неопределенность измерения температуры. Спектральный коэффициент излучения  $\varepsilon_\lambda$  берется из [7]. Недостатком данного способа является уменьшение количества проходящего света и, как следствие, низкий уровень регистрируемого сигнала. С этим в определённых пределах можно бороться, увеличивая время экспозиции кадра и входное отверстие объектива (диафрагму), но при этом будет теряться временное и пространственное разрешение. Поэтому использовать ИФ можно только в экспериментах с достаточно большими амплитудами тока, в которых можно ожидать, что температура анода после нуля тока будет достаточно высока. Забегая вперед, отметим, что большая часть результатов работы получена именно этим способом.

Способ определения температуры выглядит следующим образом. Допустим, что при некоторой температуре банд лампы  $T_{\text{бл}}$  отсчёт от неё равен полученному нами отсчёту от некоторой части поверхности анода, имеющей температуру  $T_a$ . Тогда в соответствии с уравнением Вина имеем:

$$\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})} c_1' \lambda^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T_a}} = \varepsilon_{\lambda(\text{W})} c_1' \lambda^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T_{\text{бл}}}}$$

где  $\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})}$  и  $\varepsilon_{\lambda(\text{W})}$  – спектральные коэффициенты эмиссии CuCr и W соответственно,  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} [\text{Вт} \cdot \text{м}^2]$ ,  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} [\text{м} \cdot \text{К}]$ ,  $\lambda$  – длина волны в метрах,

После логарифмирования и простых преобразований получим связь между

температурой банд лампы  $T_{\text{бл}}$  и температурой анода  $T_a$ :

$$T_a = T_{\text{бл}} / \left( 1 - T_{\text{бл}} \lambda \frac{\ln \left( \frac{\varepsilon_{\lambda(W)}}{\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})}} \right)}{c_2} \right)$$

В качестве примера, возьмём  $\lambda = 0,775$  мкм,  $T_{\text{бл}} = 2200$  К (что соответствует максимальным регистрируемым в нашей работе температурам),  $\varepsilon_{\lambda(W)} = 0,43$  [37],  $\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})} = 0.42$  [7]. При подстановке в уравнение выше получим  $T_a = 2206$  К, т.е. практически ту же температуру, что и температура банд лампы. Это ожидаемо, т.к. коэффициент эмиссии CuCr, использованный нами при оценке, практически равен коэффициенту эмиссии W. Малое расхождение между  $T_a$  и  $T_{\text{бл}}$  позволяет сделать допущение о том, что можно использовать  $\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})} = \varepsilon_{\lambda(W)}$ , дабы упростить процедуру определения температуры анода.

Какова точность получаемых результатов сказать трудно, т.к. ошибка определения  $\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})}$  в [7] не указана. Если предположить, что на самом деле значение  $\varepsilon_{\lambda(\text{CuCr})}$  меньше (или больше), чем полученное в [7], например, на 15%, то для температуры анода получим значение  $T_a = 2243$  К (или 2164 К). Видим, что разница в получаемых оценках температуры составляет не более 45 К (при максимальных температурах, регистрируемых в работе). Данное значение будем использовать в качестве оценки погрешности измерений, связанной с неопределенностью коэффициента излучения.

Технически процедура определения температуры первым и вторым способом не отличаются. Первым этапом в работе являлась градуировка эталонного источника – банд-лампы. Градуировка банд-лампы (установление зависимости температуры нити от тока накала) осуществлялась с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью ОМП-054, позволяющего определить яркостную температуру  $T_s$  нити лампы. Преобразование яркостной температуры в истинную  $T$  осуществлялось исходя из соотношения  $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_s} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left( \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \right)$ , где  $\lambda = 650$  [нм] – длина волны, в котором измеряется яркостная температура,  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  [м · К] – постоянная,  $\varepsilon_{\lambda}$  – спектральный коэффициент излучения вольфрама. Погрешность в определении температуры не превосходила 15 К (для каждого значения температуры нити банд-лампы проводилось варьирование температуры нити пирометра до тех пор, пока нить пирометра не «соплется» с лентой банд-лампы; диапазон температур, в котором нить пирометра «сливалась» с лентой банд-лампы составлял не более 15 К). Результаты градуировки приведены ниже (Рисунок 2.4.).

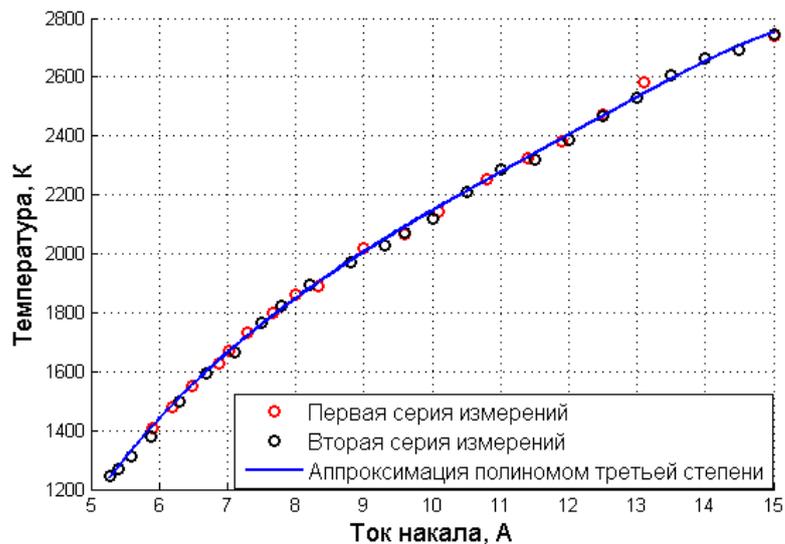


Рисунок 2.4. Градуировка банд-лампы оптическим пирометром.

Невязка аппроксимирующей функции с экспериментальными точками не превосходила 20 К. После устанавливалось однозначное соответствие между температурой вольфрамовой нити и отсчетами приемника излучения, т.е. производилась калибровка камеры по банд-лампе (Рисунок 2.5.). Красная кривая – съемка с красным фильтром (дабы понапрасну не перегружать камеру излучением дуги), синяя и черная – съемка с интерференционным фильтром IF775 (с максимумом пропускания на длине волны 775 нм).

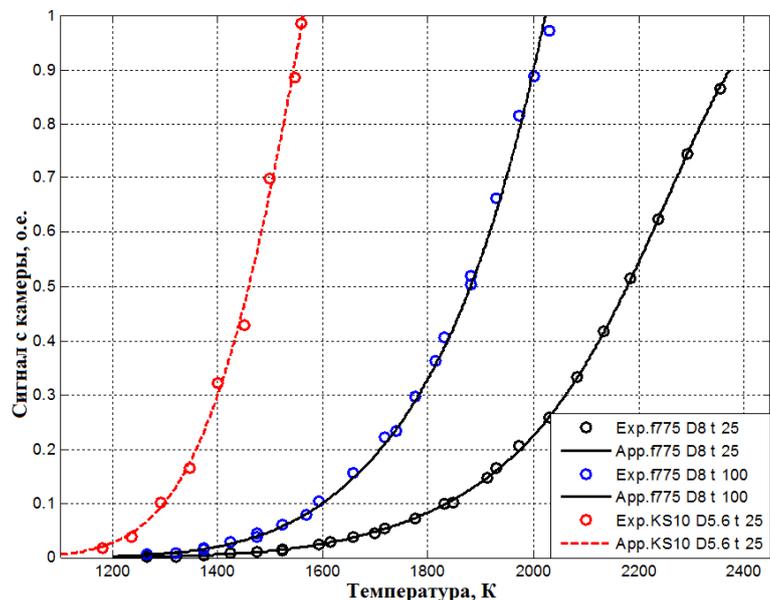


Рисунок 2.5. Пример калибровочных кривых видеокамеры по банд-лампе (зависимость среднего выходного сигнала камеры от температуры нити). В легенде указаны основные параметры режимов (наименование используемого оптического фильтра, диафрагма, время экспозиции).

Как говорилось выше, калибровка производилась при тех же условиях, при которых производилась съемка анода. Т.е. одинаковыми являлись ход лучей, используемые фильтры, время экспозиции кадра, диафрагма. Окно, через которое велась видеосъемка, каждый раз

при вскрытии вакуумной камеры (каждые 3-5 сильноточных импульсов) снималось и использовалось для калибровки, чтобы учесть возможное запыление и уменьшение светопропускания (после чего окно промывалось).

Отметим, что калибровка камеры осуществлялась по тому участку нити лампы, по которому лампа градуировалась пирометром. Для случаев с использованием ИФ невязка аппроксимации и экспериментальных точек не превосходила 25 К.

Таким образом, погрешность определения температуры анода при съемке через ИФ, учитывающая погрешности градуировки банд-лампы и калибровки камеры, погрешность, связанную с неопределенностью  $\varepsilon_{\lambda}(CuCr)$  (которая по оценкам, сделанным выше, составляет ~45 К при максимальных регистрируемых температурах), не превышает 100 К.

В работе была проверена линейность выходного сигнала камеры от экспозиции и диафрагмы, что позволяло в дальнейшем при различных выдержках и диафрагмах использовать одну калибровочную зависимость, умноженную на соответствующий коэффициент. Также отметим, что при значениях ниже  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  (в относительных единицах) выходной сигнал камеры «тонет» в шумах. Для всех сделанных в настоящей работе съемок с использованием ИФ это соответствует температуре нити ~1250 К. Т. о., при съемке с ИФ минимально возможная определяемая температура составляла ~1250 К.

Результатом съемки анода является распределение яркости излучения с его поверхности. Имея калибровочные кривые для камеры, определялась температура поверхности анода. Для каждого импульса будем приводить три картинка в нуле тока (Рисунок 2.6.). Верхняя – фотография анода. Средняя – распределение температуры, показанное путём построения изотемпературных линий поверх фотографии. Нижняя – результат определения температуры, показанный в цветовой палитре “color map hot”. Построение изотемпературных линий и контурных распределений проводилось в пакете MatLab с помощью функций «contour» и «contourf» соответственно. Сверху над тремя картинками будет указываться информация о номере импульса, параметрах съемки (скорости съемки, времени экспозиции, фильтре), амплитудном значении тока, количестве точек инициации разряда (напомним, что количество точек поджига определялось по виду осциллограммы напряжения согласно главе 1.3), а также максимальная температура на поверхности.

Для удобства рассмотрения кадров на изображение анода накладывались эллипсы, большая ось которых соответствовала диаметру плоской части анода. Также были нанесены прорези. При этом учитывалось, что при прогреве анода его накладка прогибается, и

соответственно деформируются изображения прорезей. Прогиб анода и правильность наложения эллипса определялись с помощью фотосъемки КС с разведёнными электродами без дуги (анод подсвечивался специально изготовленным светодиодным источником) непосредственно перед дуговым импульсом.

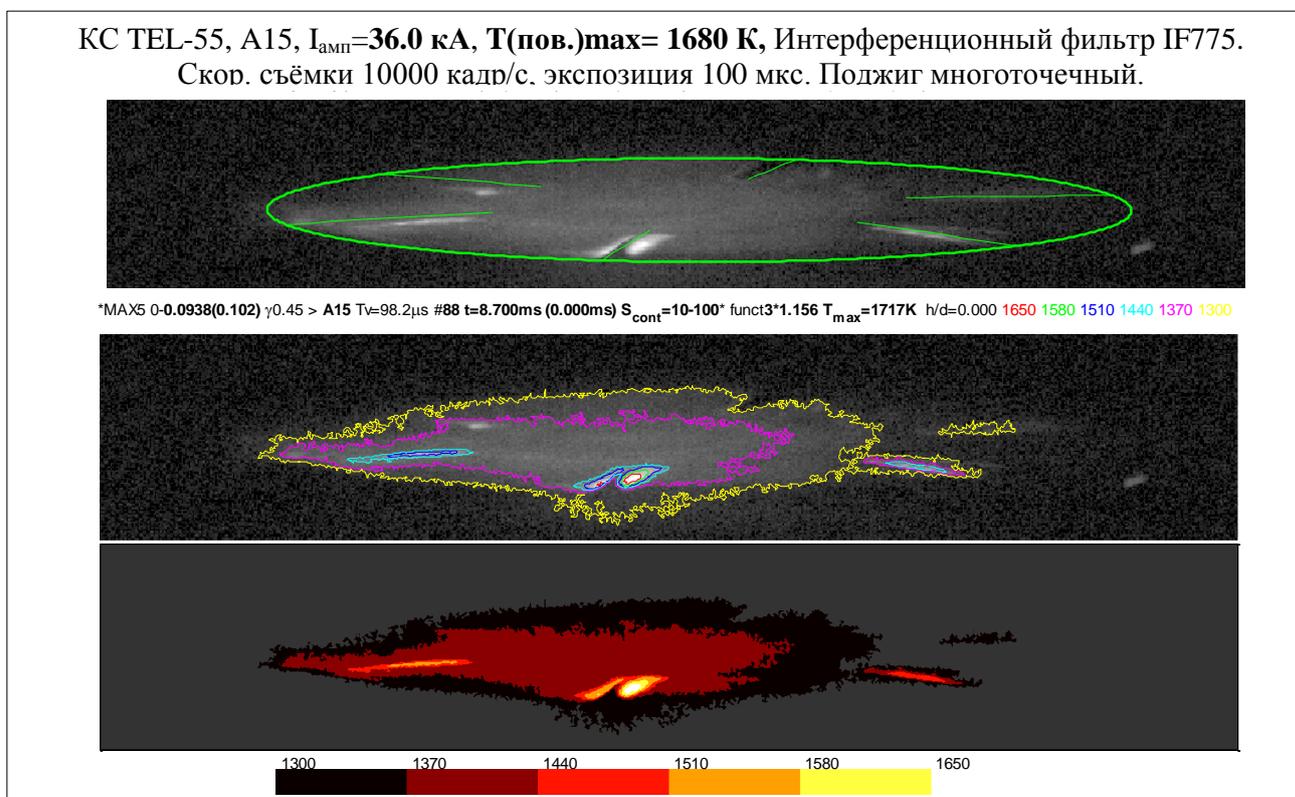


Рисунок 2.6. Пример результатов определения температуры поверхности анода. КС TEL-55.

В работе представляют интерес участки поверхности анода достаточно большой площади (которая способна к генерации достаточного количества металлического пара). Поэтому в качестве минимальной рассматриваемой площади была выбрана площадь  $\approx 1$  мм<sup>2</sup>. По нашим оценкам, излучение с такой площади регистрируется 5 пикселями камеры. Потому под максимальной температурой на поверхности анода будем понимать значение изотермы, оконтуривающей 5 пикселей на изображении с камеры. Очевидно, что внутри этого участка могут быть участки меньшей площади, имеющие несколько более высокую температуру, но учитывая их малый размер, их температурой мы не будем интересоваться. Также в режимах, где будут обнаруживаться капли (площадь изображения которых не меньше  $\sim 10$  пикселей), будет приводиться значение температуры капли  $T(\text{кап.})_{\text{max}}$ , получаемое таким же способом, как и для максимальной температуры на поверхности анода.  $T(\text{кап.})_{\text{max}}$  – температура самой горячей капли (если в импульсе их встречается несколько). Из одной фотографии при нуле тока обычно невозможно отличить капли от выступов на поверхности анода. Обнаружить

капли удаётся только при анализе последовательности фотографий, т.к. капли движутся быстрее, чем выступы, и через некоторое время исчезают из поля зрения.

### 2.2.3. Съёмка анода через два интерференционных фильтра

**Третий способ.** Фотографирование анода на двух различных длинах волн обеспечивает существенное преимущество. Если используются близкие длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , то температуру анода можно определить, без информации о коэффициенте эмиссии материала, из которого изготовлен анод. Для определения температуры нужно знать не  $\epsilon_\lambda$ , а отношение  $\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2}$ , которое для металлических поверхностей близко к единице, если  $\lambda_1$  не сильно отличается от  $\lambda_2$  (в отличие от диэлектриков,  $\epsilon_\lambda$  для металлических поверхностей меняется плавно и не слишком быстро при изменении длины волны).

Используя делительные пластинки, зеркала и ИФ с максимумом пропускания на разных длинах волн, можно получить на матрице камеры два изображения поверхности анода в различных длинах волн, определяемых использованными ИФ. Ниже приведена фотография оптического столика для работы в двухканальном режиме (Рисунок 2.7.), пристыкованного к стеллажу, на котором установлена вакуумная камера (красными линиями обозначен ход лучей при фотографировании).

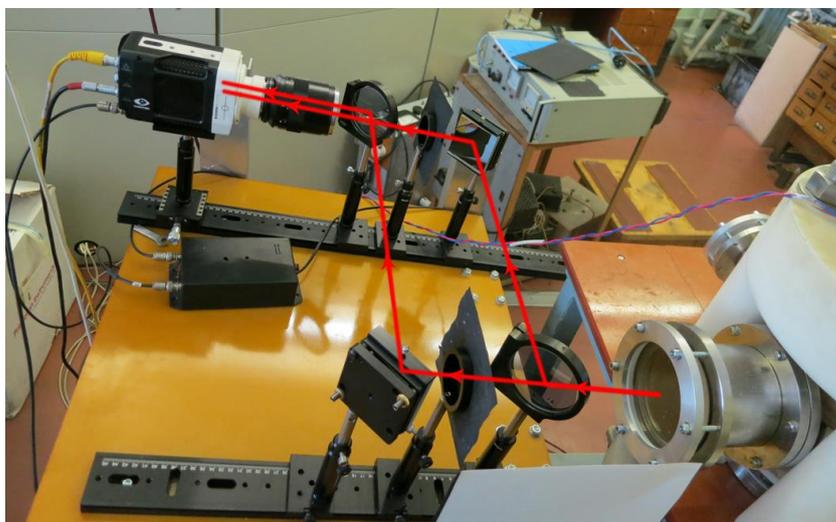


Рисунок 2.7. Фотографирование анода через два ИФ (на двух длинах волн). Фотография оптического столика. Красными линиями обозначен ход лучей при фотографировании.

Отметим, что при таком способе фотографирования ухудшается пространственное разрешение (примерно в два раза), т.к. на матрице камеры фиксируются два изображения поверхности анода. Более того, при прочих равных условиях имеет место ослабление яркости каждого изображения фотографируемого источника на матрице камеры более, чем в четыре раза по сравнению с фотографированием через один фильтр (потери в четыре раза за

счёт делительных пластинок, а кроме того ещё примерно 10% из-за отражений).

Для определения температуры в данном случае нужно действовать следующим образом. На двух изображениях анода, полученных на разных длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  нужно выбрать один и тот же элемент поверхности и определить отношение его яркостей  $k$ , которое, используя уравнение Вина, можно записать так:

$$\varepsilon_{\lambda_1(CuCr)} c_1' \lambda_1^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda_1 T_a}} / \varepsilon_{\lambda_2(CuCr)} c_1' \lambda_2^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda_2 T_a}} = k$$

здесь  $\varepsilon_{\lambda_1(CuCr)}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2(CuCr)}$  – коэффициенты эмиссии материала анода при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,  $T_a$  – температура выбранного участка поверхности анода. (Под яркостью объекта понимается значение изолинии, оконтуривающей 5 пикселей на фотографии, что, учитывая пространственное разрешение съемки в данном режиме, соответствует  $\sim 2 \text{ мм}^2$  на поверхности анода).

Далее нужно определить при какой температуре ленты банд-лампы отношение яркостей её изображений, полученных на одном кадре при различных длинах волн, будут равны тому же значению  $k$ :

$$\varepsilon_{\lambda_1(W)} c_1' \lambda_1^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda_1 T_{6л}}} / \varepsilon_{\lambda_2(W)} c_1' \lambda_2^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda_2 T_{6л}}} = k$$

здесь  $\varepsilon_{\lambda_1(W)}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2(W)}$  – коэффициенты эмиссии вольфрама при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,  $T_{6л}$  – температура выбранного участка поверхности ленты банд-лампы.

Приравнивая  $k$  для участка поверхности анода и участка поверхности банд-лампы, проведя сокращения и логарифмирование, получим:

$$\frac{1}{T_{6л}} - \frac{1}{T_a} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{c_2 (\lambda_1 - \lambda_2)} \ln(\varepsilon_{\lambda_1(CuCr)} \cdot \varepsilon_{\lambda_2(W)} / \varepsilon_{\lambda_2(CuCr)} \cdot \varepsilon_{\lambda_1(W)})$$

Значение множителя  $\frac{\lambda_1 \lambda_2}{c_2 (\lambda_1 - \lambda_2)}$  при  $\lambda_1 = 775 \text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 800 \text{ нм}$  составляет  $\approx 1.8 \cdot 10^{-3} [1/\text{K}]$ , логарифм  $\ln(\varepsilon_{\lambda_1(CuCr)} \cdot \varepsilon_{\lambda_2(W)} / \varepsilon_{\lambda_2(CuCr)} \cdot \varepsilon_{\lambda_1(W)})$  при близких значениях  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  практически равен нулю. Тогда получается:  $T_a = T_{6л}$ .

Определение  $k$  для банд-лампы проводилось с помощью калибровочных кривых (полученных при фотографировании банд лампы). Еще раз отметим, что съемка банд-лампы проводилась при тех же условиях, что и съемка анода, т.е. дублировались все параметры съемки и оптическая схема эксперимента.

Калибровочные кривые для двух используемых ИФ, полученные при фотографировании банд лампы с помощью данной схемы, приведены ниже (Рисунок 2.8.). Далее была получена зависимость отношения яркостей излучения банд-лампы (сигналов камеры), полученных при фотографировании на разных длинах волн, от температуры нити

банд-лампы. Отношение сигналов с матрицы камеры в зависимости от температуры приведено на графике ниже (Рисунок 2.9.).

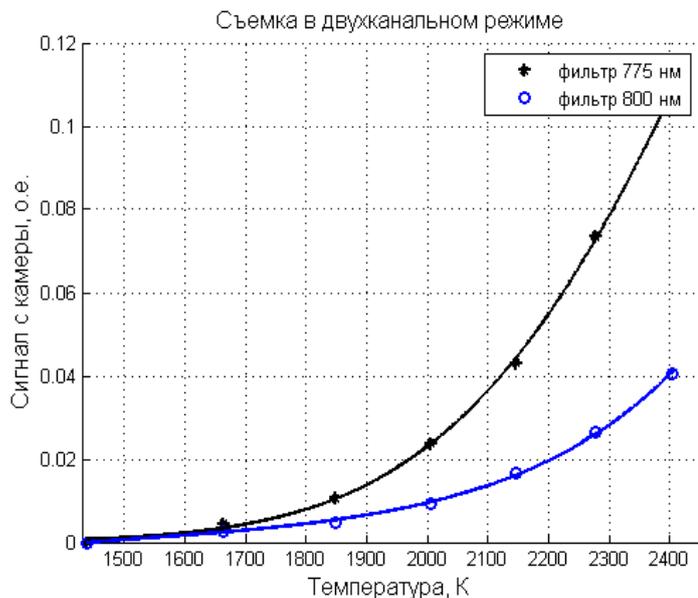


Рисунок 2.8. Калибровочные кривые в двухканальном режиме (экспозиция 50).

Приведенные на Рисунке 2.9. результаты показывают, что кривая при  $T > \sim 2100$  К «выползает» и потому точность определения температуры, превосходящей  $T \sim 2100$  К, низкая. Ослабление яркости, связанное потерей света при прохождении через делительные пластинки ограничивает диапазон возможных регистрируемых температур снизу (сигнал «тонет» в шумах при температуре нити  $\sim 1650$  К).

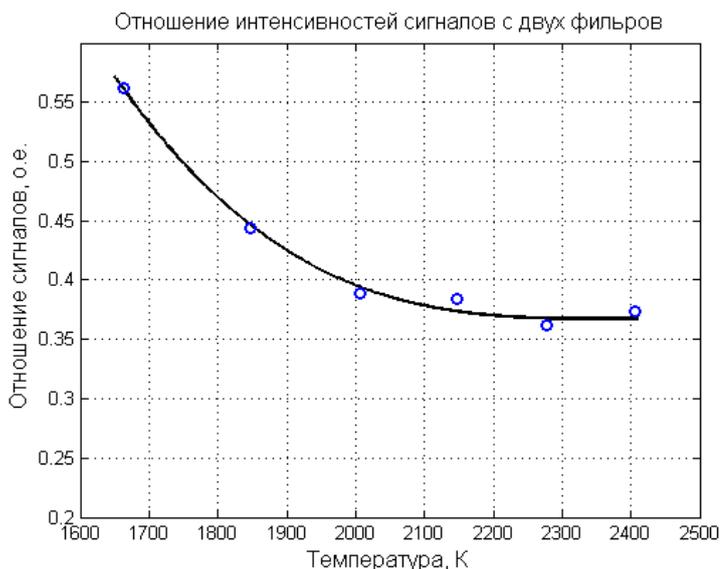


Рисунок 2.9. Отношение сигналов с камеры от двух изображений ленты банд лампы, полученных при использовании двух ИФ.

Ниже приведен пример (Рисунок 2.10.) с результатами определения температуры данным способом. Отношения сигналов объекта, выделенного кружочком равняется 0.41. Согласно зависимости  $k(T)$  (Рисунок 2.9.) это соответствует температуре  $\sim 1840$  К.

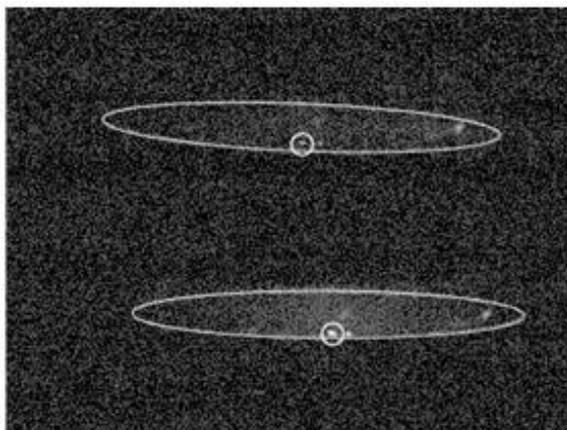


Рисунок 2.10. Результат съемки поверхности анода через два ИФ. (выдержка 50 мкс). КС TEL-55,  $I_{amp}=41.1$ кА. Фильтры – 800 нм (сверху) и 775 нм (снизу). Отношение сигналов объекта, выделенного кружочком (справа) равно 0,41, что соответствует температуре  $\sim 1840$  К.

Данный способ позволяет определять температуру только отдельных участков поверхности (температуры которых лежат в пределах от  $\sim 1600$  К до  $\sim 2100$  К). Точность выбора одного и того же объекта на двух фотографиях не высокая и определяется пространственным разрешением съемки (1 пиксель  $\approx 0,4$  мм в горизонтальном направлении).

В тоже время результаты измерений с помощью двух ИФ слабее всего зависят от абсолютного значения коэффициента эмиссии исследуемого материала  $\epsilon_\lambda$ . Потому фотографирование анода через два ИФ позволяет оценить погрешность (вносимую неопределённостью  $\epsilon_{\lambda(CuCr)}$ ) в измерениях температуры на одной длине волны (описанных в пункте 2.2.2.). Действительно, проводя съемку анода на двух длинах волн, получаем два изображения поверхности анода (каждое из которого снято на одной длине волны). Для каждого ИФ имеются калибровки камеры (Рисунок 2.12.), по которым можно определить температуру поверхности анода (способом, описанным в пункте 2.2.2.). Таким образом, для участка на поверхности анода можно получить три значения температуры: одно значение определяется через отношение яркости излучения на двух длинах волн ( $T_{2IF}$ ), и два значения – на одной длине волны ( $T_{IF775}$  и  $T_{IF800}$ ).

Результаты определения температуры некоторых участков на поверхности анода двумя способами приведены ниже в виде графика (Рисунок 2.11.). Значения были получены из короткой серии импульсов (5 импульсов для КС TEL-55 с токами порядка отключающей способности для данной КС). По оси абсцисс отложен условный номер объекта, температура

которого определялась. Результаты сортированы в порядке возрастания значения температуры, полученного на двух длинах волн.

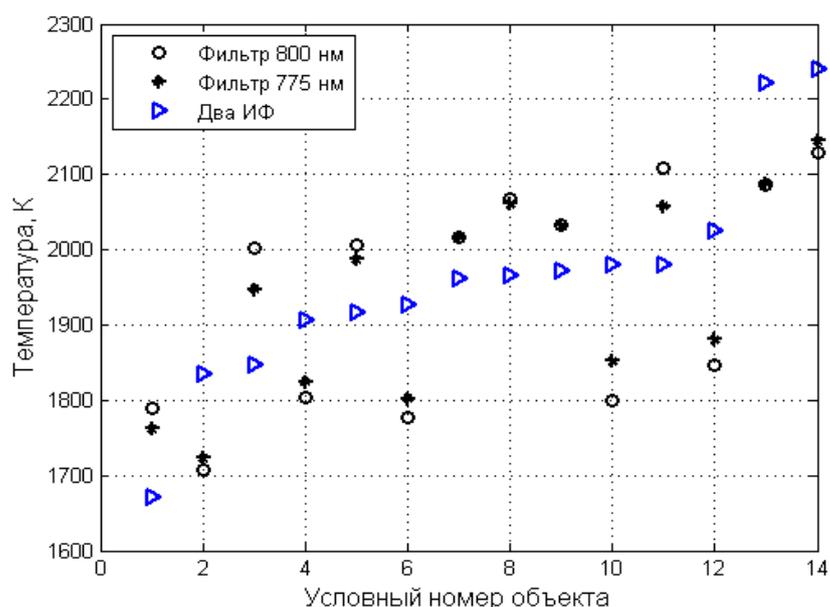


Рисунок 2.11. Сравнение двух результатов определения температуры двумя способами (фотографирование на двух длинах волн и на одной длине волны)

Заметим, что для каждого объекта значения температур, определяемых на одной длине волны ( $T_{IF775}$  и  $T_{IF800}$ ), разнятся не сильно (максимум на 50 К). Разница между  $T_{2IF}$  и средним значением между  $T_{IF775}$  и  $T_{IF800}$  не превосходит 150 К, а в среднем составляет ~100 К. Важным моментом является тот факт, что отклонения в получаемых температурах на одной длине волны от значений температуры, определяемых на двух длинах волн, не носят систематического характера. Это позволяет сделать вывод о том, что используемые  $\epsilon_\lambda(CuCr)$  (взяты из [7]) для определения температуры анода на одной длине волны вполне корректны. Т.е., можно считать, что погрешность (вносимая неопределённостью  $\epsilon_\lambda(CuCr)$ ) определения температуры через один ИФ невелика. Таким образом, оцененная нами в 100 К погрешность определения температуры анода при съемке через один ИФ (в пункте 2.2.2.) является оценкой сверху.

### 2.3. Характеристики исследуемых КС

В настоящей работе исследуются три АМП-контактные системы, использующиеся ПГ «Таврида Электрик» в вакуумных дугогасительных камерах для выключателей среднего класса напряжений. Отличаются контактные системы габаритами, генерируемыми аксиальными магнитными полями и предельными отключаемыми токами.

Значения предельных отключаемых токов  $I_{lim}$  (токи  $I \geq I_{lim}$  КС отключает крайне редко)

для каждой КС нам известны из результатов испытаний, проводимых в ПГ «Гаврида Электрик» (Таблица 2., верхняя строчка). Также нам известны значения токов гарантированного отключения  $I_{guar}$ , (при протекании токов амплитудой  $I < I_{guar}$ , КС гарантированно отключает ток при приложении ПВН). Ниже приведена фотография электрода (Рисунок 2.12.), на которую нанесены основные размеры: диаметр электрода (D1), диаметр плоской части накладки (D2), расстояние между концами диаметрально противоположных прорезей (D3).

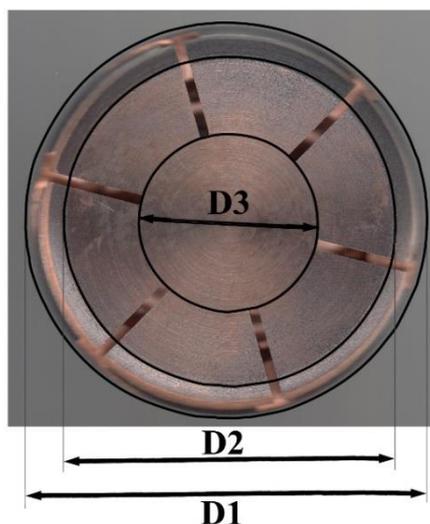


Рисунок 2.12. Фотография электрода TEL-55.

В Таблице 2 приведены три основных размера накладок (обозначенных на Рисунке 2.12.) и результаты вычисления соответствующих площадей и плотностей тока (в максимуме тока) при токе, равном предельному отключаемому. Видно, что плотность предельного отключаемого тока (в расчёте на площадь диаметром D2) для TEL-64 минимальная – 2,8 кА/см<sup>2</sup>. Для TEL-55 и TEL-50 плотности тока выше – 3.0 кА/см<sup>2</sup> и 3.6 кА/см<sup>2</sup> соответственно.

Таблица 2. Характеристики КС.

	TEL-50, $I_{lim} = 42$ кА $I_{guar} = 40$ кА			TEL-55, $I_{lim} = 45$ кА $I_{guar} = 42$ кА			TEL-64, $I_{lim} = 57$ кА $I_{guar} = 52$ кА		
	D, мм	S, см <sup>2</sup>	J, кА/см <sup>2</sup>	D, мм	S, см <sup>2</sup>	J, кА/см <sup>2</sup>	D, мм	S, см <sup>2</sup>	J, кА/см <sup>2</sup>
1	50	19.6	2.14	55	23.7	1.9	64	32.2	1.77
2	38.6	11.7	3.59	44	15.2	2.96	51	20.4	2.79
3	25.03	4.94	-	25.03	4.94	-	30.03	7.06	-

Важной характеристикой КС является генерируемое АМП и скорость его проникновения в межэлектродный промежуток. В работе было проведено исследование

АМП характеристик всех трех контактных систем. В первую очередь было проведено экспериментальное измерение генерируемых магнитных полей. Измерения проводились с помощью калиброванного датчика Холла Honeywell SS496A. Схема измерений представлена ниже (Рисунок 2.13., слева). Питание цепи осуществлялось с помощью источника, выдающего на выходе прямоугольный импульс тока амплитудой  $\sim 1\text{кА}$  и длительностью  $\sim 4.5\text{ мс}$ . Ток в цепи измерялся на малоиндуктивном шунте сопротивлением  $1.5\text{ мОм}$  с помощью осциллографа Tektronix TDS3014B. Два контакта замыкались тремя медными переключками диаметром и высотой 6 мм, симметрично располагающимися на краю плоской части накладки через  $120^\circ$  (Рисунок 2.13., справа). Измерения проводились в середине зазора. Пространственное разрешение обеспечивалось путем перемещения датчика (от импульса к импульсу, в радиальном направлении над центром лепестка).

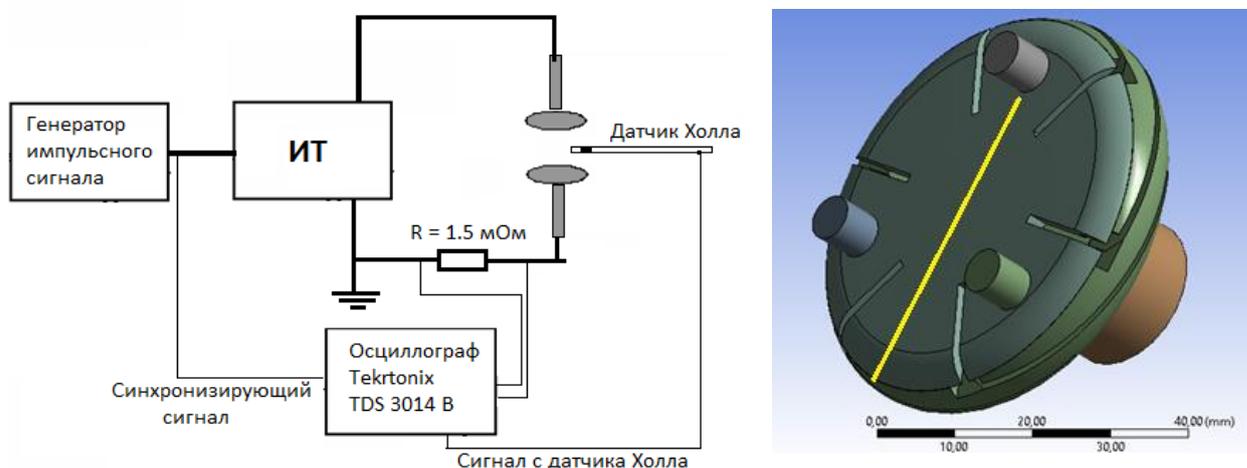


Рисунок 2.13. Измерение магнитных характеристик АМП электродов. Слева – измерительная блок схема. Справа – схема расположения токовых переключек между контактами. Желтая линия – путь измерения АМП.

Такие измерения позволили получить представление о том, какое приведённое поле способна генерировать некоторая КС и как быстро поле проникает в промежуток. Однако в реальных испытаниях, ток между контактами протекает не по отдельным вставкам, а по плазме, заполняющей более или менее однородно весь промежуток, и протекающий ток меняется в соответствии с законом синуса. Потому для определения АМП было использовано компьютерное моделирование в пакете Comsol Multiphysics.

### 2.3.1. Расчет магнитных полей в пакете Comsol Multiphysics

Методика численного расчета генерируемых магнитных полей при протекании тока через контакты была взята из [28] (подробно постановка численной задачи описана в приложении 2). Решалась переходная задача, учитывались возбуждаемые вихревые токи.

В первую очередь были сопоставлены результаты экспериментальных измерений с компьютерным моделированием в аналогичной постановке (электроды замыкались 3мя перемычками, расположенными как в эксперименте (Рисунок 2.13., справа), форма тока – импульс прямоугольной формы амплитудой 1 кА). В качестве примера ниже приведены распределения АМП для двух КС в различные моменты времени (Рисунок 2.14.).

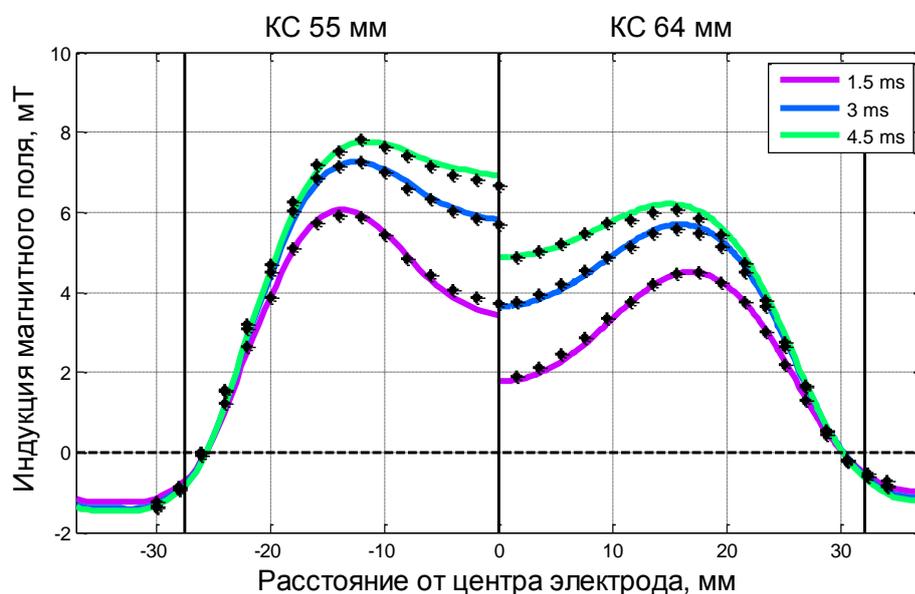


Рисунок 2.14. Распределение АМП при питании **прямоугольным** импульсом тока. Точки – Эксперимент Сплошные линии – моделирование. Вертикальными линиями указаны габориты контактов (D1, Таблица 2).

Полученные экспериментально и численно распределения АМП между собой хорошо согласуются. Поэтому далее мы пользовались результатами расчётов при реальных условиях протекания тока (в модели электроды замыкались сплошным цилиндром высотой 6 мм, диаметром равным диаметру электрода и проводимостью  $10^4$  См/м, импульс тока – первый полупериод синуса амплитудой 1 кА). Ниже (Рисунок 2.15) приведены результаты расчёта радиальных распределений АМП для различных КС в различные моменты времени (распределение по пути в центре зазора над серединой лепестка). В левой части рисунка показаны абсолютные значения магнитного поля (мТл), в правой – значения приведённого магнитного поля (мТл/кА – отношение магнитной индукции к величине тока в данный момент времени).

Ниже (Рисунок 2.16.) показан результат сравнения распределений АМП различных КС в момент времени  $t = 6$  мс. Расчёты показали, что во всех КС максимальное значение индукции АМП достигается примерно через  $1 \div 1.5$  мс после достижения максимального значения тока.

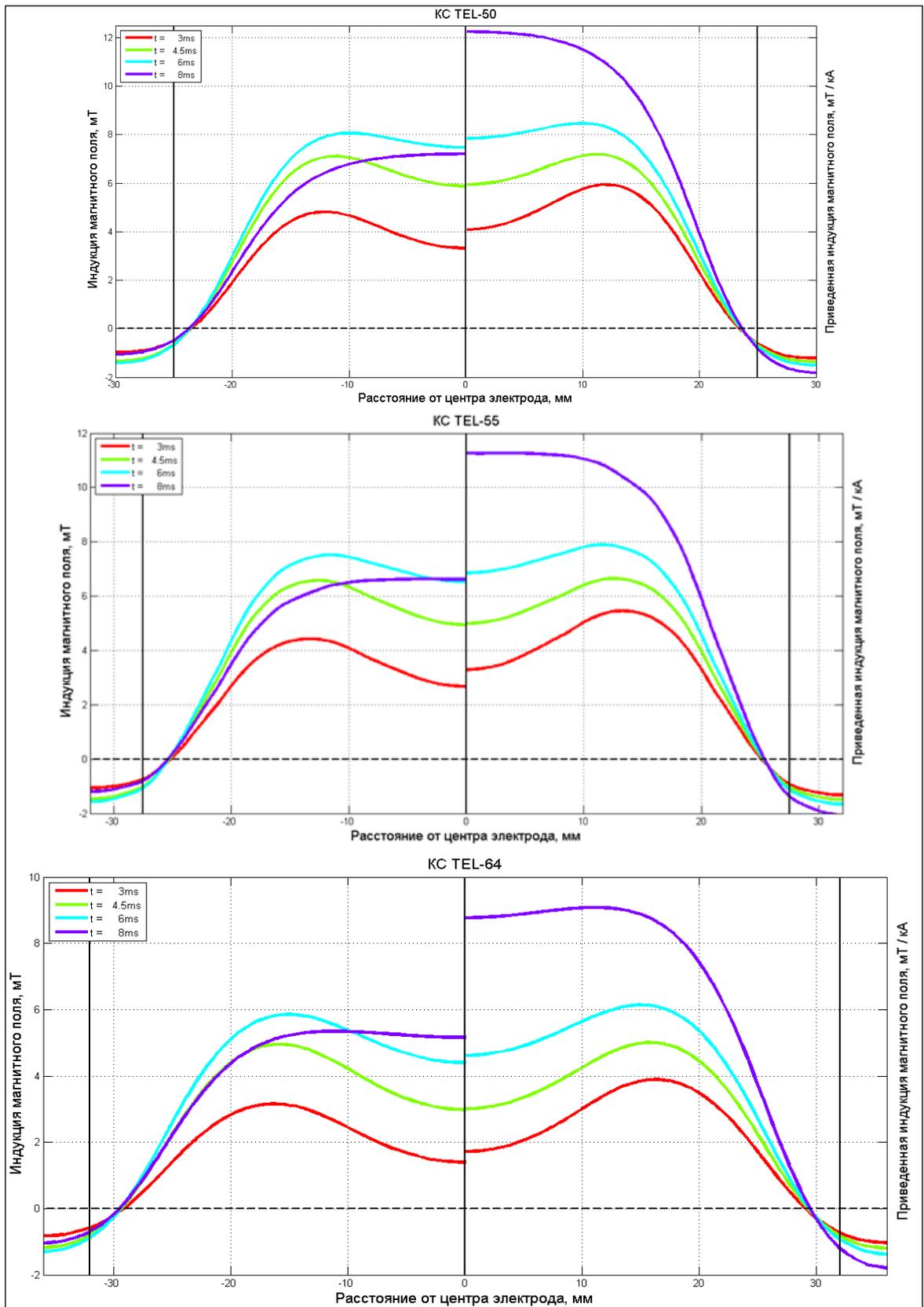


Рисунок 2.15. Распределение АМП при питании **синусоидальным** импульсом тока амплитудой 1 кА. Представлены результаты для пути в середине зазора над центром лепестка контакта. Вертикальными линиями указаны габориты контактов (D1, Таблица 2).

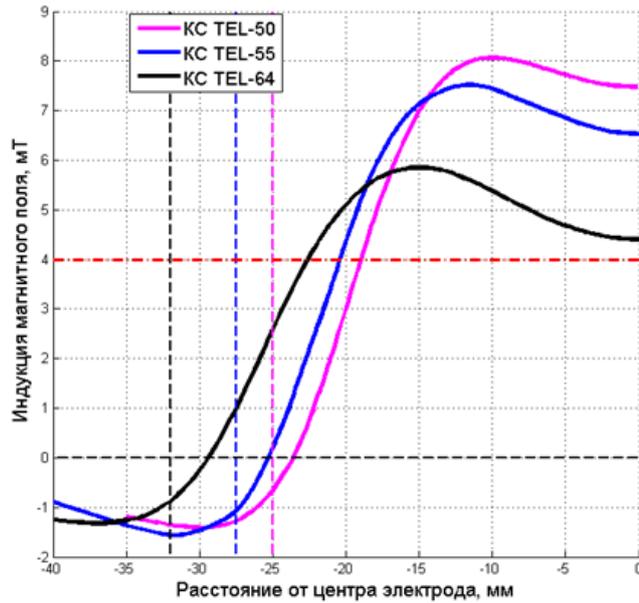


Рисунок 2.16. Распределение АМП в трех КС в момент времени  $t = 6$  мс при питании **синусоидальным** импульсом тока. Вертикальными линиями отмечены диаметры КС (D1, Таблица 2).

При увеличении диаметра КС магнитное поле медленнее проникает в промежуток, максимальное значение индукции уменьшается. Сплошное покрытие приосевой части электрода магнитным полем при условии  $B_z > 4$  мТл/кА реализуется в КС TEL-50 и TEL-55 через  $3 \div 3.5$  мс после начала подачи тока, а в КС TEL-64 – существенно позднее, через 5.5 мс (Рисунок 2.17.). (Напомним, что в [26] было обнаружено, что плотность тока на катоде резко падает на периферии электрода при значениях индукции АМП ниже уровня в 4 мТл/кА.)

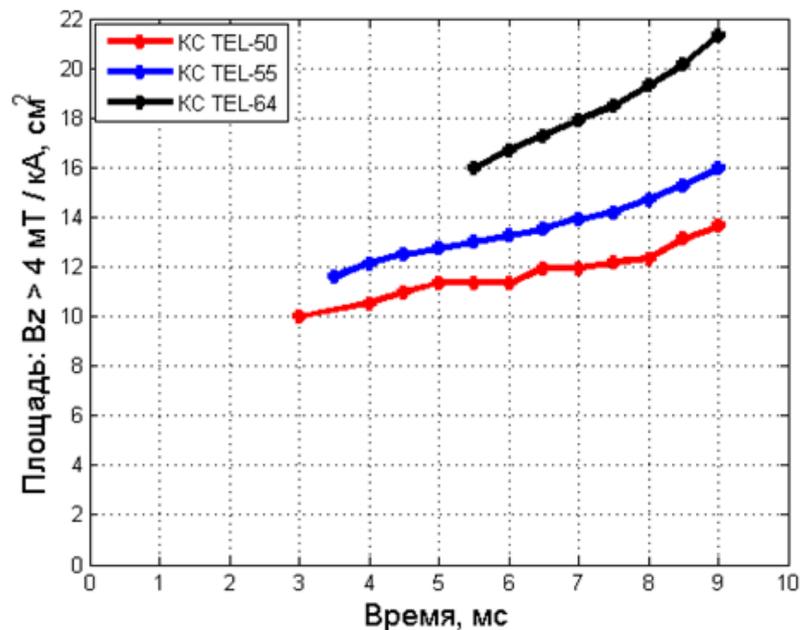


Рисунок 2.17. Площадь покрытия приосевой области приведенным АМП:  $B_z > 4$  мТл/кА при питании **синусоидальным** импульсом тока.

Для TEL-50 вблизи максимума тока (т.е. на 5-ой – 6-ой мс) площадь, покрытая приведённым полем  $B_z > 4$  мТл/кА, практически равна площади плоской части накладки (т.е. площади по диаметру D2) этой КС (Таблица 2.) – отношение площадей равняется 0.98, т.е. «используется» практически вся плоская часть электрода. Однако при увеличении диаметра КС это отношение падает. Отношение площади, покрытой полем  $B_z > 4$  мТл/кА, к площади по диаметру D2 составляет для TEL-55 и TEL-64, соответственно, 0.85 и 0.78. Если считать, что токовая привязка к электродам имеет диаметр, равный диаметру части поверхности, покрытой полем  $B_z > 4$  мТл/кА, то при  $I \approx I_L$  плотности тока во всех КС примерно одинаковы ( $\sim 3.5 \div 3.6$  кА/см<sup>2</sup>).

### 2.3.2. Использование результатов измерений АМП для контроля деградации КС

Как говорилось во введении, одной из задач настоящей работы являлся контроль состояния электродов и генерируемых ими АМП. Данная задача возникла в ходе проведения первой серии измерений температуры (в КС TEL-64). После одного из импульсов тока (импульс с номером С109) амплитудой  $\sim 57$  кА (которому предшествовал десяток импульсов с амплитудами тока  $\sim 40 \div 57$  кА) было обнаружено, что окно для наблюдений сильно запылилось. Вскрытие камеры показало, что оба электрода, особенно анод, сильно деформированы. Главное – прорезы на электродах полностью заплавлены (Рисунок 2.18., слева). В данной системе электродов было проведено измерение АМП, которое показало, что поле сильно просело (Рисунок 2.18., справа).

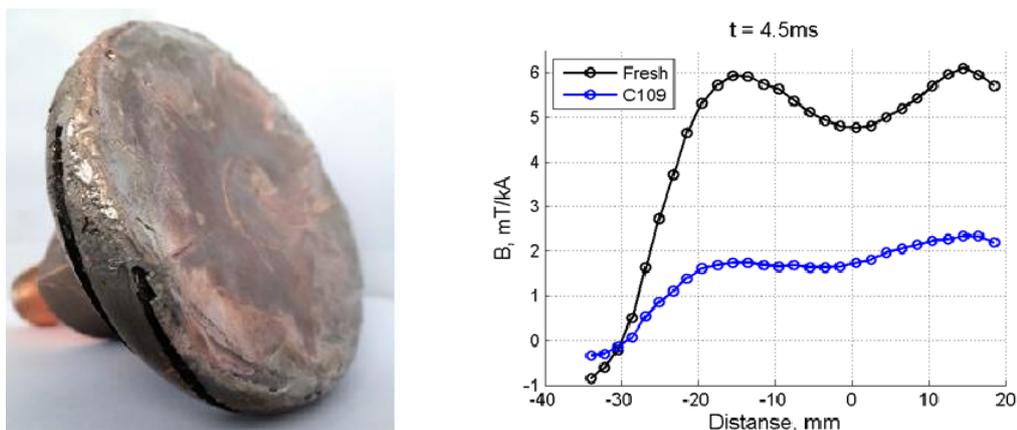


Рисунок 2.18. Слева – фотография анода. Справа: чёрным – АМП, генерируемое парой свежих электродов, синим – АМП, генерируемое парой электродов изъятых из камеры после импульса С109.

Просмотр кадров видеосъемки импульса С109 показал, что разряд «вываливался» из межэлектродного промежутка (плазма разлеталась в боковых направлениях, что стало причиной сильного запылению окна). Столь слабое генерируемое АМП, по-видимому, было недостаточным для управления дугой.

В последующих испытаниях тщательным образом проводился контроль состояния электродов. В режимах с интересующими нас токами ( $I > 0.6I_{lim}$ ) состояние электродов контролировалось после каждых 3-5 импульсов (не считая чистящих импульсов амплитудой, не превышающей 20 кА). После каждых ~10 рабочих импульсов анод, как правило, заменялся свежим электродом. Катод, в силу меньшего теплового воздействия дугой, заменялся реже – каждый второй раз, когда заменялся анод (т.е. после ~20 сильноточных импульсов). На подлежащих замене анодах были, как правило, заплавлены 1-3 прорези.

Критерием замены анода было снижение генерируемого электродом приведенного АМП на 15-20%. АМП измерялось в паре со свежим электродом по причине того, что катод в ходе за ~10 импульсов визуально слабо отличался от свежего электрода. Ниже (Рисунок 2.19.) приведена фотография анода TEL-64, подлежащего замене, и результаты измерения АМП вдоль различных лепестков. На фотографии анода видно, что заплавлена прорезь между лепестками «b» и «c», а также частично заплавлены прорези между лепестками «a» и «b» и лепестками «c» и «d». В легенде графика (Рисунок 2.19., справа) указаны лепестки, определяющие направление измерения АМП – лепесток, вдоль которого заводился датчик Холла. Видно, что поле в целом (по всем направлениям измерения) просело примерно одинаково.

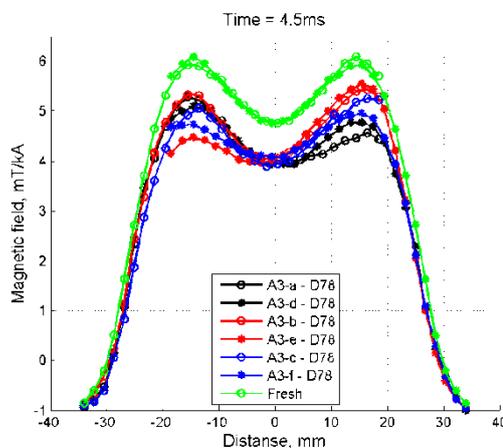
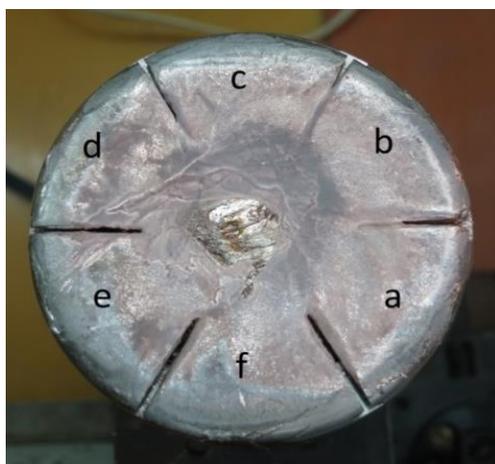


Рисунок 2.19. Слева – фотография анода TEL-64, подлежащего замене (после имп. D78). Справа – распределение АМП, генерируемого анодом (после имп. D78) и свежим электродом. Буква в легенде указывает на лепесток, вдоль которого вводился датчик Холла.

Во всех КС деградация электродов проявлялась также прогибом электродной накладки. Наиболее заметен прогиб накладки в КС TEL-50. В данной КС факт деформации накладки обнаруживался даже при воздействии на свежие электроды короткой серией импульсов (1-2 сильноточных и предшествующие им чистящие импульсы). После ~десятки сильноточных импульсов накладка анода прогибалась настолько, что центральная часть

накладки оказывалась ниже периферии на 1-2 мм. Демонстрирует сказанное фотография анода (Рисунок 2.20.), приведенная ниже. Фотография сделана после импульса С33 (в серии было 12 импульсов были амплитудой  $I_{ампл} \approx 30$  кА, остальные - чистящие). На накладку анода ребром была установлена металлическая линейка. Из фотографии видно, что линейка касается наклейки только на периферии рабочей поверхности – на краю плоской части наклейки (D2, Таблица 2).

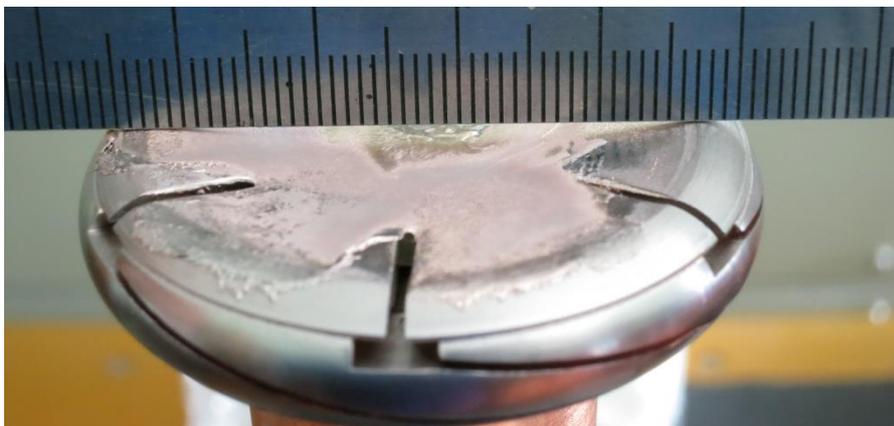


Рисунок 2.20. Фотография поверхности анода TEL-50 после имп. С33.

### 3. Результаты эксперимента и обсуждение

В настоящих исследованиях состояние поверхности анодов во всех трех КС говорит о том, что в процессе горения в сильноточных режимах рабочая поверхность анода оплавляется. В качестве примера рассмотрим анод TEL-50, изъятый из вакуумной камеры после двух сильноточных импульсов амплитудой  $\sim 31$  кА (Рисунок 3.1.). Из фотографии анода видно, что поверхность его была оплавлена. Видны следы движения расплава. На фотографии анода в увеличенном масштабе отчетливо виден наплыв жидкого материала на холодную поверхность, а также застывшая металлическая капля.

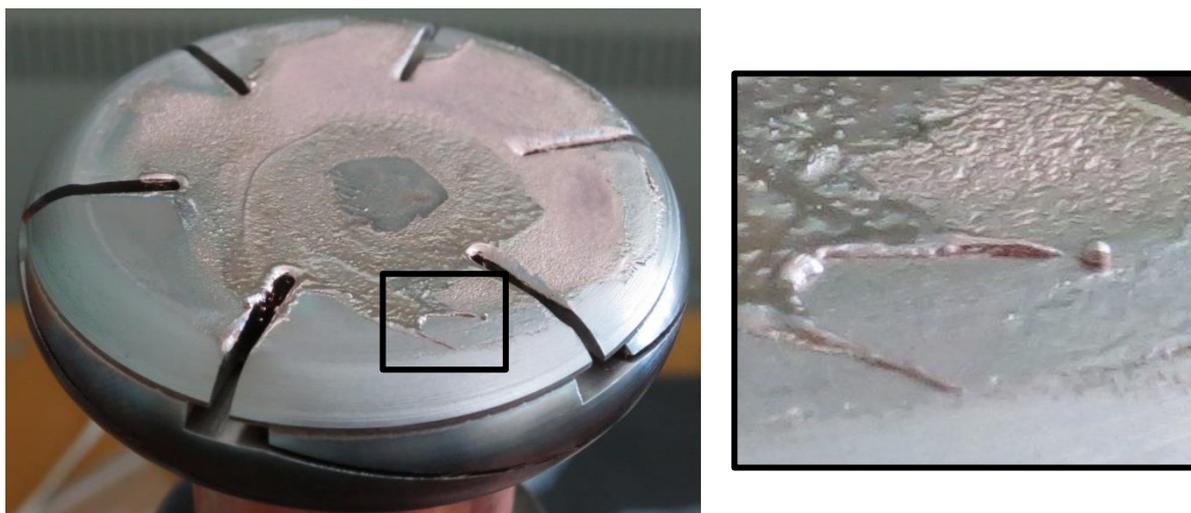


Рисунок 3.1. Фотография анода TEL-50 после импульсов С11 и С12. Слева – фотография анода целиком, справа- в увеличенном масштабе.

Очевидно, что тепловое состояние поверхности анода (в режимах, где анод оплавляется) в момент погасания разряда будет зависеть от динамики расплава. Потому в работе были исследованы процессы на поверхности анода, происходящие во время горения дуги (появление расплава и его динамика).

#### 3.1. Процессы на аноде во время горения дуги

При съемке анода в режимах, где определялась его температура, не было возможности наблюдать за процессами, происходящими на аноде на протяжении всего времени горения дуги (из-за сильной засветки). При съёмках с ИФ информация о процессах на аноде появлялась лишь на последней миллисекунде разряда. Поэтому были проведены серии съемок поверхности анода с сильными нейтральными фильтрами. Для всех трех контактных систем, процессы, происходящие на поверхности анода, в основном схожи. Поэтому, опишем процессы, происходящие на аноде в дуге на примере КС TEL-55.

При съемке анода в КС TEL-55, начиная с токов  $\sim 30$  кА, на поверхности анода в

приосевой части обнаруживается область расплава, на краю которой образуется вращающийся гребень. (В [38] было показано, что причиной образования гребня и его вращения является воздействие катодных плазменных струй; вращение гребня происходит т. к. импульс, передаваемый струями расплаву, имеет тангенциальную компоненту). Гребень образовывается тем раньше, чем больше амплитуда тока: при токах  $\sim 30$  кА на 5-й – 6-й мс с момента начала протекания тока, при  $I > \sim 42$  кА – еще до максимума тока. Характерный линейный размер области расплава, «окольцованной» гребнем в момент его появления, не превышает  $D_3$  (Таблица 2). После образования гребня, высота его начинает увеличиваться, вращающаяся волна расплава расширяется к периферии анода.

При сравнительно небольших амплитудах тока ( $I < \sim 37$  кА) на спаде тока к моменту времени  $\sim 7$ -8 мс высота гребня начинает уменьшаться. На последней миллисекунде разряда гребень движется, размазываясь по поверхности анода силами поверхностного натяжения, преимущественно по инерции (т.к. величина тока, а, следовательно, и передаваемый катодными струями импульс уже мал, а после 10-й мс ток вообще равен нулю). В момент погасания разряда, гребни, как правило, оказываются размазанными по поверхности анода.

По мере увеличения амплитуды тока, высота гребней растет. Начиная с  $I > \sim 37$  кА, на кадрах видеосъемок можно видеть процесс разрушения достаточно высоких гребней, в результате чего в межэлектродный промежуток выбрасывается большое количество жидкого материала (капель, которые в дальнейшем будем именовать анодными).

Ниже (Рисунок 3.2.) приведена выборка из результатов фотографирования анода через нейтральные фильтры при токе  $\sim 41$  кА. Видно, что на 5-й мс на поверхности анода формируется гребень, который под действием потоков плазмы со стороны катода начинает движение. В середине 6-й мс гребень начинает делиться на отдельные вращающиеся струи, и к концу 6-й мс разлетается на множество капель. Жидкие фрагменты летят практически вдоль поверхности анода. Большая часть из них к началу 8-й мс попадает обратно на анод (несмотря на то, что анод в наших экспериментах был расположен сверху). Возврат материала на анод может быть обусловлен как давлением плазмы со стороны катода (т.к. значение тока на 6-й мс не сильно меньше амплитудного), так и прогибом электродной накладки (см. предыдущую главу).

На кадрах в нуле тока можно видеть две движущиеся анодные капли, не вернувшиеся на анод. Похоже, что они находятся за пределами промежутка и покидают поле зрения через несколько миллисекунд после нуля тока.

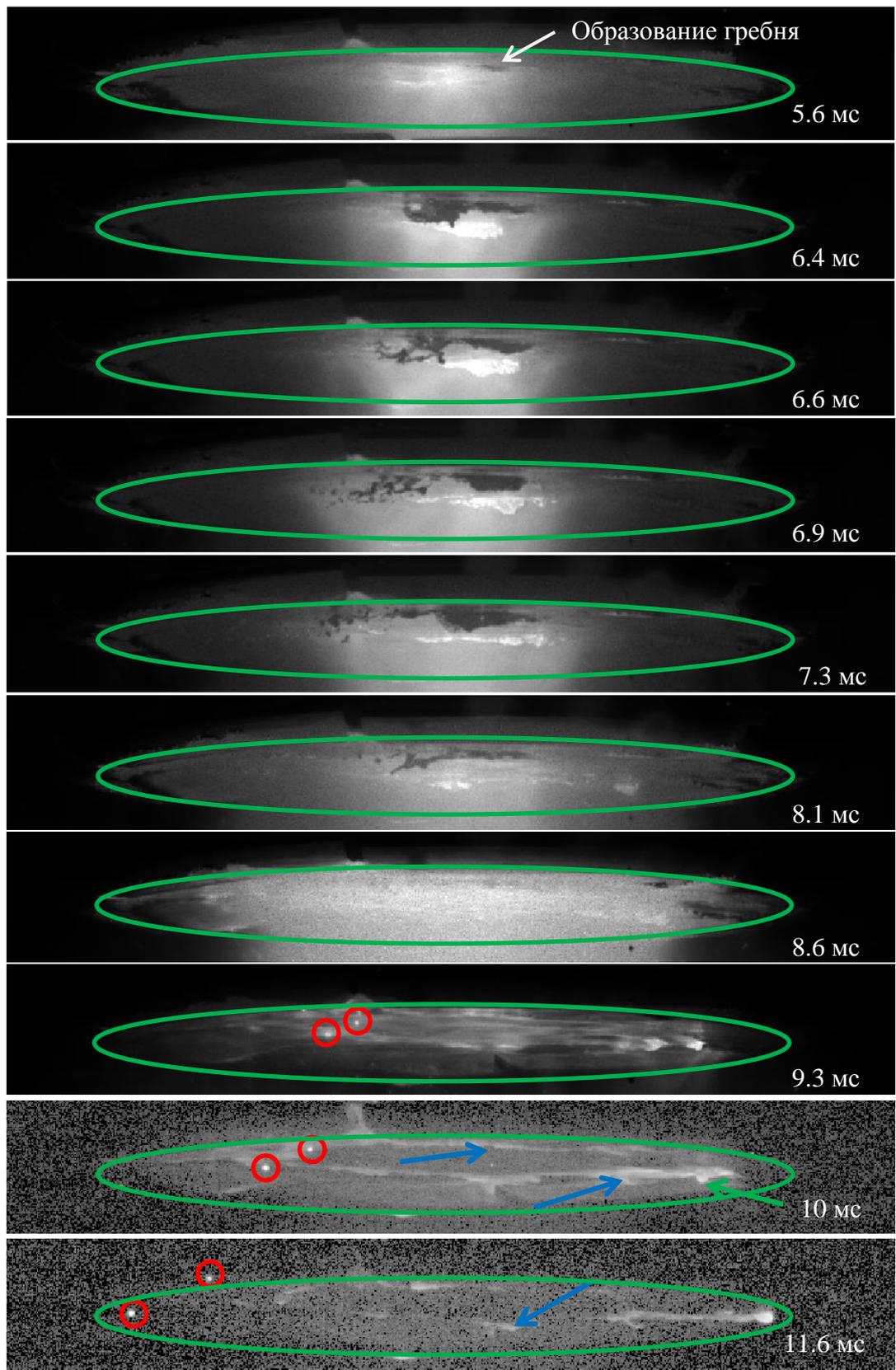


Рисунок 3.2. Выборка кадров скоростной видеосъемки анода импульса В24 (яркость на каждом кадре нормирована на максимальное значение) В правом нижнем углу указано время кадра от начала импульса тока (погасание разряда в 10 мс). Красными кружками обведены анодные капли, синими стрелками – размазанные гребни, зеленой – рельефный гребень.

Отметим, что в подавляющем большинстве испытаний в КС TEL-55 и в TEL-50 анодные капли в нуле тока отсутствовали. Как правило, анодные капли или успевали возвращаться на анод до погасания разряда, или к этому времени уже покидали поле зрения (и, соответственно, межэлектродный промежуток).

Как видим, процесс образования и движения расплава на аноде начался рано (вблизи максимума тока), и к нулю тока на темном аноде остаются лишь яркие (следовательно, существенно перегретые) фрагменты гребня, диаметр которого вследствие движения гребня и разлёта жидкости, заметно больше  $D_3$  (Таблица 2). Большая часть гребня размазана по поверхности анода. Такие фрагменты гребня будем называть размазанными гребнями (указаны на Рисунке 3.2. синими стрелками). Небольшая часть гребня оказывается достаточно рельефной, выступающей относительно поверхности анода (Рисунок 3.2., указана зеленой стрелкой). Такие фрагменты гребня в дальнейшем будем называть рельефными. Из анализа результатов съёмок поверхности анода можно сказать, что зачастую рельефные гребни оказываются движущимися после погасания дуги.

Нетривиальным является тот факт, что центральная часть анода в момент погасания разряда оказывается сравнительно холодной. Ведь на кадрах съёмки поверхности анода в дуге (Рисунок 3.2., напр.  $t=5.6$  мс) видно, что наиболее яркой (а значит и наиболее горячей) является именно приосевая область, на краю которой образуется гребень. Более того, в [26] было показано, что для данной контактной системы максимальная плотность тока приходится на приосевую область, а потому она должна была быть наиболее горячей (как в процессе горения дуги, так и в момент погасания разряда). Ответить на вопрос, почему центральная часть анода оказывается темной (а значит холодной) помогает анализ эрозионных отпечатков на аноде.

Во всех исследуемых КС, в приосевой области анода можно видеть кольцеобразные структуры застывшего материала, что является результатом вращения, расширения и размазывания гребня в процессе горения разряда с последующим застыванием расплава. Ниже (Рисунок 3.3.) приведена фотография поверхности анода TEL-55 после двух сильноточных импульсов амплитудой  $I \approx 36$  кА (A15, A16), которым предшествовали только чистящие импульсы. Внутри кольца видна область, в которой практически отсутствуют следы затвердевшего расплава.

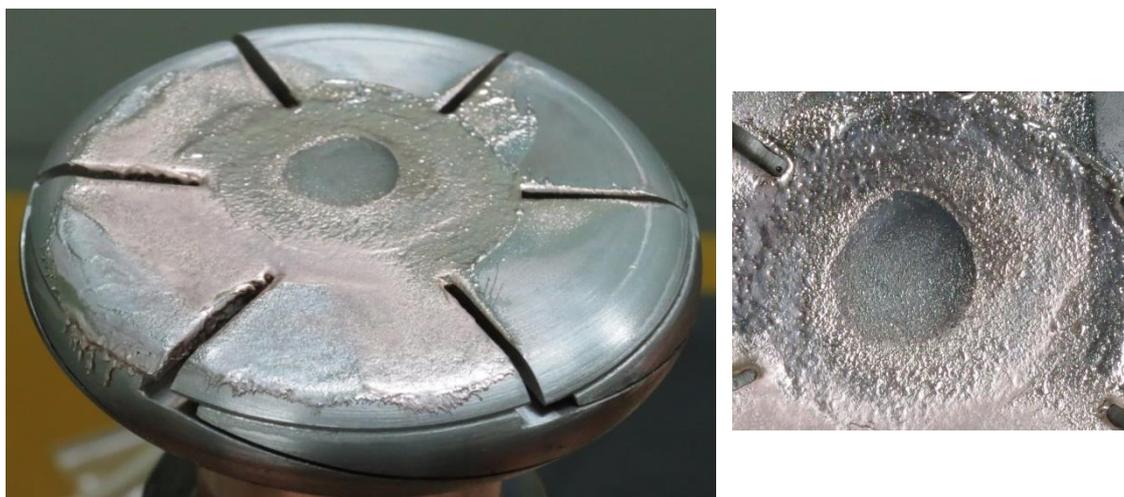


Рисунок 3.3. Фотография анода TEL-55 после импульса А16. Слева – фотография всей поверхности анода, справа – фотография приосевой области.

Похоже, что часть формирующего гребень горячего материала полностью «выдавливается» катодной плазмой из приосевой области анода. В ходе исследований нами не наблюдались ситуации с высокой температурой в центре анода. Более того, встречались случаи, где в момент погасания разряда небольшая приосевая область (из которой, по-видимому, и выдавливался расплавленный материал) оказывалась несколько темнее окружающей ее поверхности.

В нуле тока также перегретыми оказывались углы прорезей (на Рисунке 3.2. в нуле тока перегрев прорезей не наблюдается, т.к. гребни оказываются гораздо ярче углов прорезей). Причину того, что прорези в момент погасания разряда оказывались существенно горячее большей части поверхности, удалось выяснить из анализа эрозионных поражений анода.

На фотографии анода (Рисунок 3.3.) можно видеть некоторое количество солидифицированного материала на краях прорезей (слева от оси). По-видимому, в процессе горения дуги движущийся (за счет воздействия катодных плазменных струй) расплавленный металл скапливается на углах прорезей, вследствие чего ухудшаются условия для его остывания (в то время как вдали от прорези расплавленный материал размазывается по поверхности). Как результат, в момент погасания разряда края прорезей оказывались горячее большей части поверхности.

Как говорилось в начале настоящего параграфа, процессы на аноде в дуге во всех трех КС во многом схожи. Отличия проявляются во временах начала образования и разрушения гребня. В TEL-50, как и TEL-55, при токах близких к предельным отключаемым образование гребня происходит еще до максимума тока, несколько позже (на 5-6 мс) гребень

разрушается, к 8-й мс разряда большая часть анодных капель либо возвращается обратно на анод, либо в подавляющем большинстве испытаний покидает промежуток (и поле зрения).

Анализируя результаты съемок анода КС TEL-64, было установлено, что гребень в этой КС появляется позднее, чем в КС TEL-50 и TEL-55. При токах  $45 \text{ кА} < I < 52 \text{ кА}$  в КС TEL-64 гребни образуются в конце 6-ой – середине 7-й миллисекунды (от начала протекания тока). Гребни, как правило, невысокие, и к моменту погасания разряда оказываются размазанными по поверхности анода. При увеличении тока свыше 52 кА расплав появляется немного раньше, образуется гребень, который разрушается незадолго до погасания разряда. Например, при токах 56-57 кА (Рисунок 3.4.), образование гребня происходит в середине 6-й мс, а разрушение – за 1.5 - 2 мс до погасания разряда.

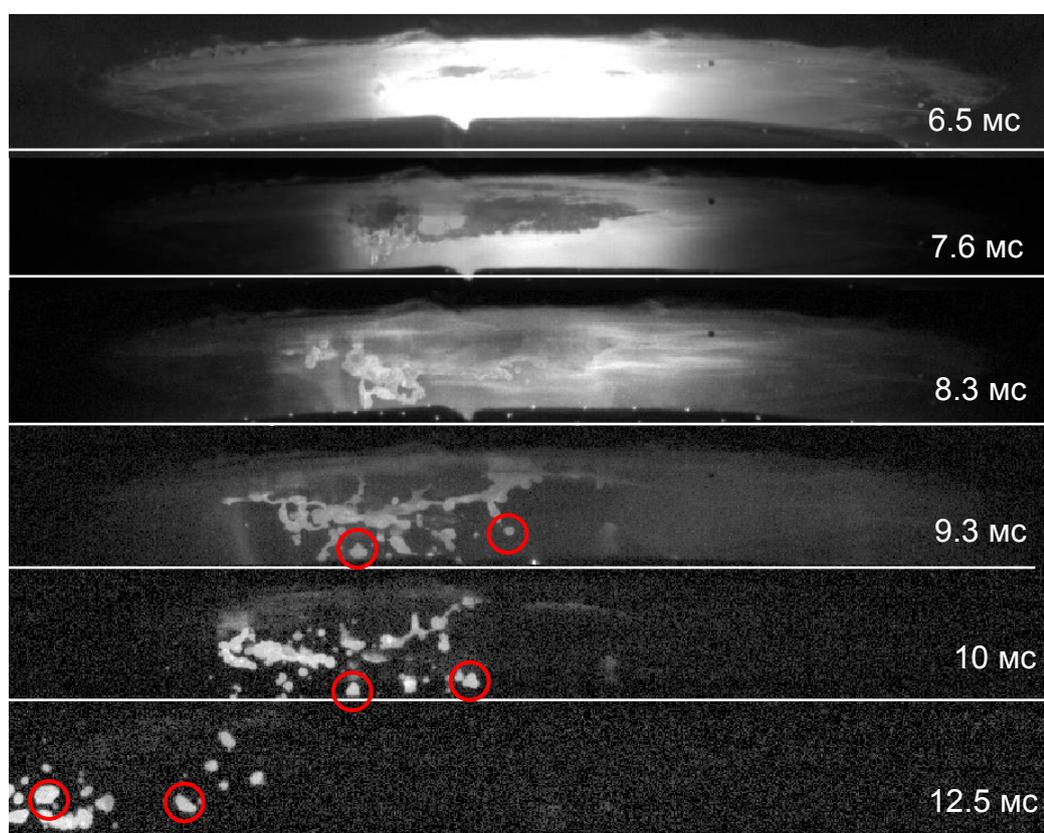


Рисунок 3.4. Выборка кадров скоростной видеосъемки анода.  $I = 57.1 \text{ кА}$ . В правом нижнем углу указано время кадра от начала импульса тока (погасание разряда в 10 мс). Красными кружками обведены некоторые анодные капли. Внизу некоторых кадров видна тень от катода. Мелкие светящиеся точки на катоде – КП.

Из кадров съемки разряда в КС TEL-64 (Рисунок 3.4.) видно, что незадолго до погасания разряда часть гребня разлетается в виде капель. Другая часть, не контактируя с поверхностью анода, движется в промежутке, дробясь на капли (в том числе и после погасания разряда). По всей видимости, давление плазмы со стороны катода в эти моменты времени уже мало и не может способствовать возврату жидкого материала обратно на анод.

В нуле тока анодные капли, и крупные оторвавшиеся фрагменты гребня являются самыми яркими, а, следовательно, и самыми горячими объектами.

Ниже (Рисунок 3.5.) приведена выборка фотографий импульса с током  $I = 56.9$  кА. Съёмка интересна тем, что на ней справа от оси можно видеть каплю, момента образования которой мы не видим (т.к. съёмка данного импульса проводилась с ИФ), а слева от оси – рельефный сильно выступающий гребень, от которого отрывается капля в момент погасания разряда. Оставшаяся часть гребня в течение нескольких сотен микросекунд после нуля тока растекается по поверхности анода.

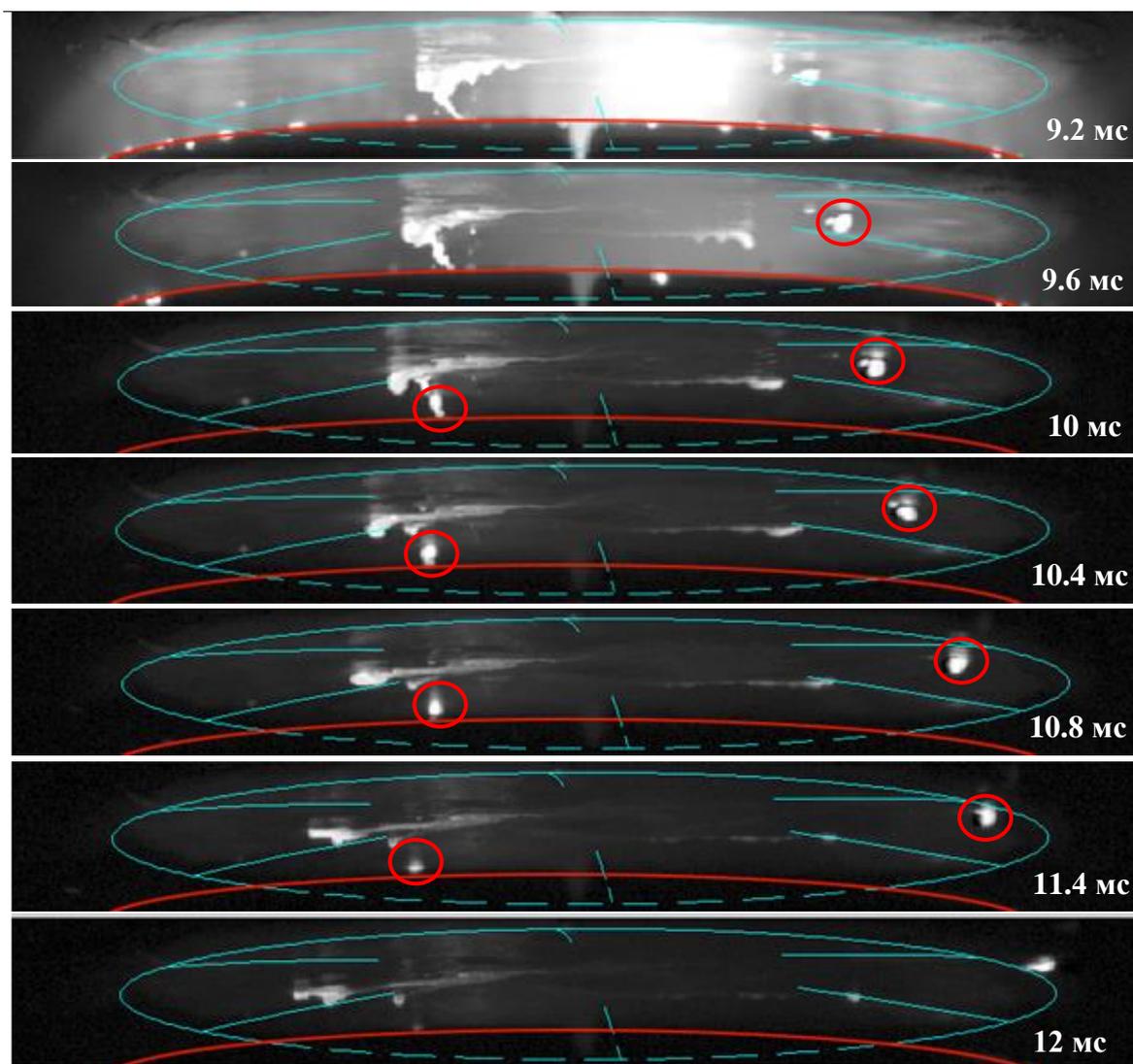


Рисунок 3.5. Выборка кадров скоростной видеосъёмки анода.  $I = 56.9$  кА. В правом нижнем углу указано время кадра от начала импульса тока (погасание разряда в 10 мс). Красными кружками обведены анодные капли. Внизу некоторых кадров видна тень от катода. Мелкие светящиеся точки на катоде – КП.

Из выборки фотографий (Рисунок 3.5.) видно, что капля (справа от оси) остывает медленнее, чем расплав на аноде (на последнем кадре выборки, когда после нуля тока прошло 2 мс, видно, что капля светит ярче, чем расплав, растёкшийся по аноду). Это не

удивительно, т.к. капля охлаждается только за счет излучения и испарения, а гребень охлаждается ещё и теплопроводностью в тело анода.

Отметим, что в КС TEL-64 на кадрах, заснятых в момент погасания разряда, при токах  $I > 52$  кА (токах порядка предельных отключаемых), в подавляющем большинстве импульсов анодные капли присутствовали в промежутке. Скорости капель точно определить из фотоснимков нельзя, (т.к. неизвестна компонента скорости, перпендикулярная плоскости изображения). Можно сделать лишь оценку снизу:  $\sim 5 \cdot 10^2$  см/с. При таких скоростях, анодные капли, двигаясь практически перпендикулярно оси КС, покидают межэлектродный промежуток за времена порядка единиц миллисекунд.

Возникает вопрос, почему же в КС TEL-50 и TEL-55 разрушение анодного гребня происходит существенно раньше, чем в КС и TEL-64? Можно предположить, что это связано с тем, что приведенное аксиальное магнитное поле, генерируемое КС TEL-64 меньше, чем в двух других КС и проникает оно в промежуток медленнее. Напомним, что сплошное покрытие поверхности электродов КС TEL-64 полем с индукцией  $B_z > 4$  мТл/кА происходит примерно на 2-2.5 мс позднее, чем поверхности электродов TEL-50 и TEL-55 (Рисунок 2.17.). Дуга в КС TEL-64 начинает контролироваться АМП немного позднее максимума тока.

Предположим, что токовая привязка к электродам имеет диаметр, равный диаметру части поверхности, покрытой полем  $B_z > 4$  мТл/кА. Тогда при предельных отключаемых токах плотности тока во всех трех КС примерно одинаковы и равны  $\approx 3.5$  кА/см<sup>2</sup>. Потому, казалось бы, образование расплава и гребня во всех КС должно происходить в одинаковые моменты времени. Однако, в КС TEL-50 и TEL-55 в предшествующие образованию гребня несколько миллисекунд, тепловое воздействие на приосевую область анода было более сильным, в то время как в КС TEL-64 АМП ещё не контролировало дугу, дуга «перемещалась» по аноду.

Подведем итог сказанному выше. В процессе горения дуги на краю расплавленной приосевой части анода образуется гребень. В КС TEL-50 и TEL-55 при больших токах гребень разрушается существенно раньше погасания разряда (примерно за 3.5 – 4 мс до нуля тока), и его фрагменты к нулю тока либо возвращаются на анод, либо покидают поле зрения (в подавляющем большинстве импульсов). В КС TEL-64 разрушение гребня происходит существенно позже – за 1.5-2 мс до погасания разряда. Во всех трех КС в нуле тока на поверхности темного анода видны небольшие по размеру перегретые области. Это фрагменты анодного гребня, рельефные и размазанные по поверхности, и углы прорезей, а в КС TEL-64 еще и анодные капли (при токах, близких к предельным отключаемым токам).

### 3.2. Температура анода непосредственно после погасания разряда

В данном разделе будут представлены результаты определения температуры анода непосредственно после нуля тока. Т.е. анализировался кадр съёмки, следующий после погасания разряда. Факт погасания разряда устанавливался по погасанию последнего КП и резкому ослаблению яркости изображения. Результаты будут изложены в порядке проведения эксперимента. Вначале будут описаны результаты в КС TEL-64, далее в КС TEL-50 и TEL-55.

#### 3.2.1. КС TEL-64

Ниже приведена выборка (Рисунок 3.6.) из кадров съёмки поверхности анода, полученных при испытаниях КС TEL-64 при разных токах вплоть до предельного отключаемого тока  $\sim 57$  кА, и результаты их обработки.

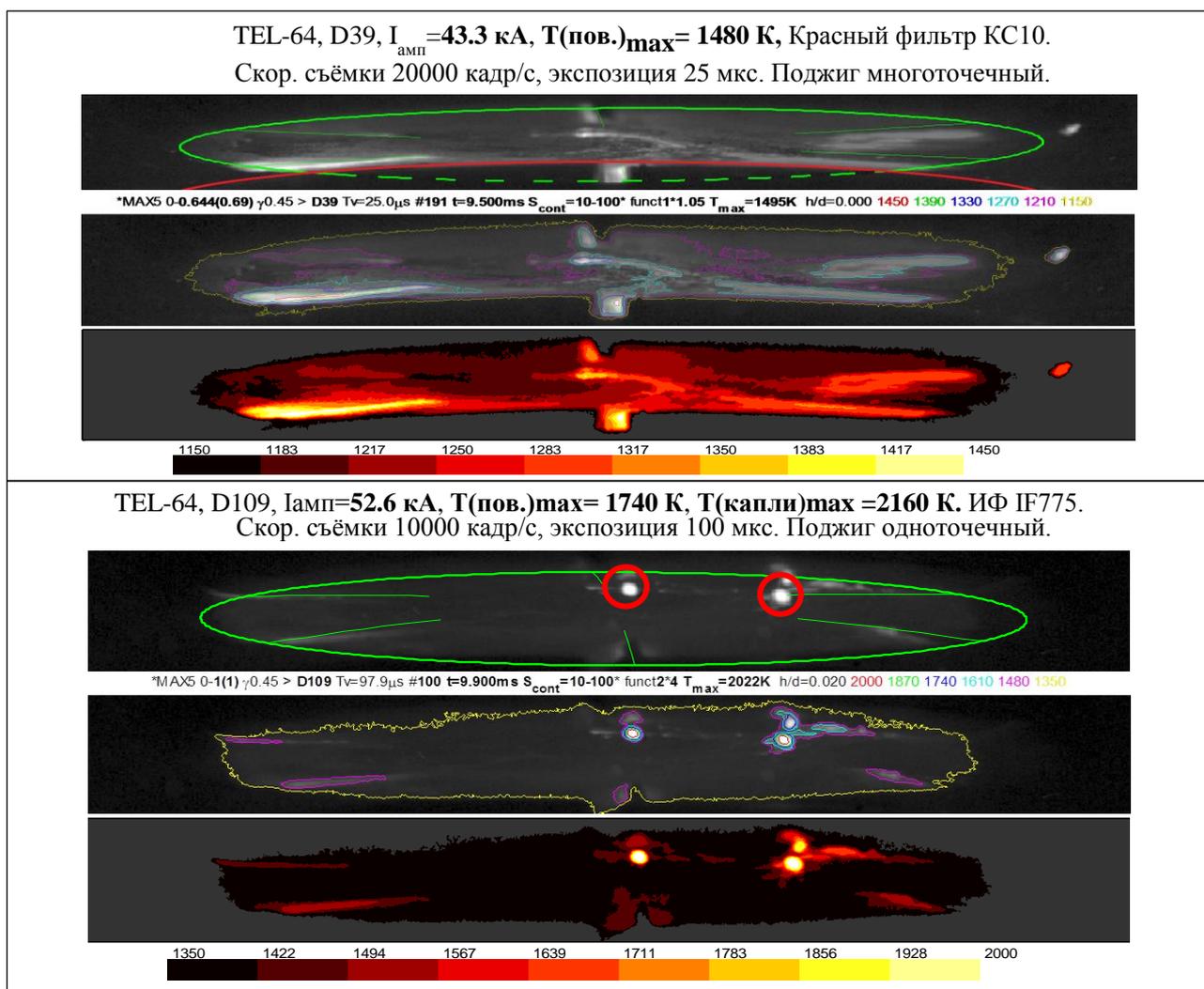
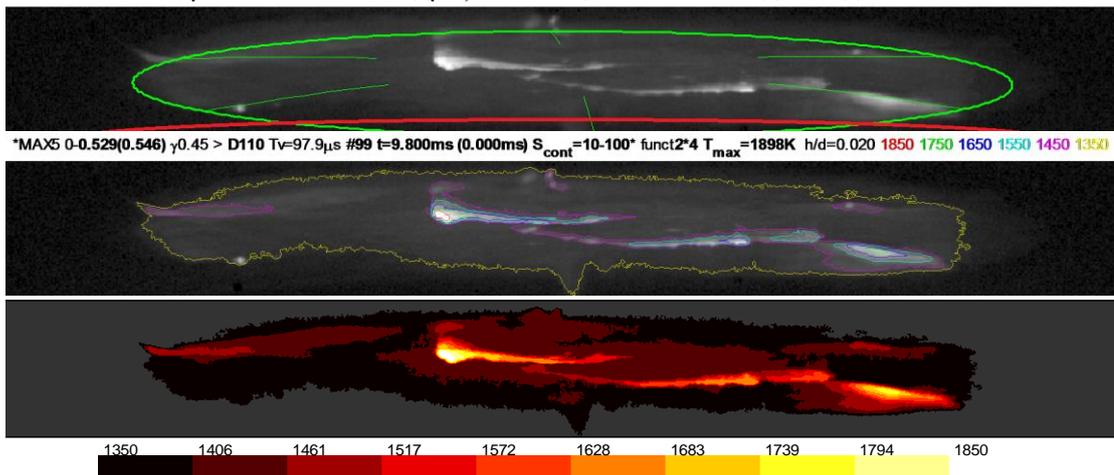
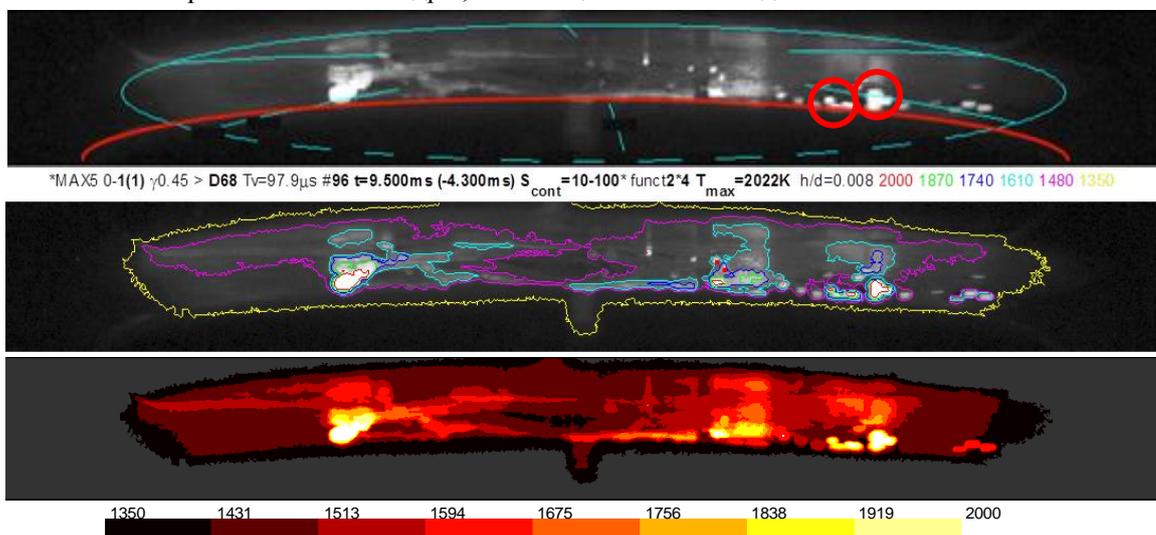


Рисунок 3.6. Часть 1. Фотографии анода в нуле тока и результаты определения температуры. Красными кружками обведены анодные капли.

TEL-64, D110, Iамп=54.0 кА, T(пов.)max= 1870 К, ИФ IF775.  
 Скор. съёмки 10000 кадр/с, экспозиция 100 мкс. Поджиг однотоочечный.



TEL-64, D68, Iамп=55.7 кА, T(пов.)max= 1700 К, T(капли)max =2170 К. ИФ IF775.  
 Скор. съёмки 10000 кадр/с, экспозиция 100 мкс. Поджиг многотоочечный.



TEL-64, D122, Iамп=56.9 кА, T(пов.)max= 2000 К, T(капли)max =2130 К. ИФ IF775.  
 Скор. съёмки 10000 кадр/с, экспозиция 100 мкс. Поджиг многотоочечный.

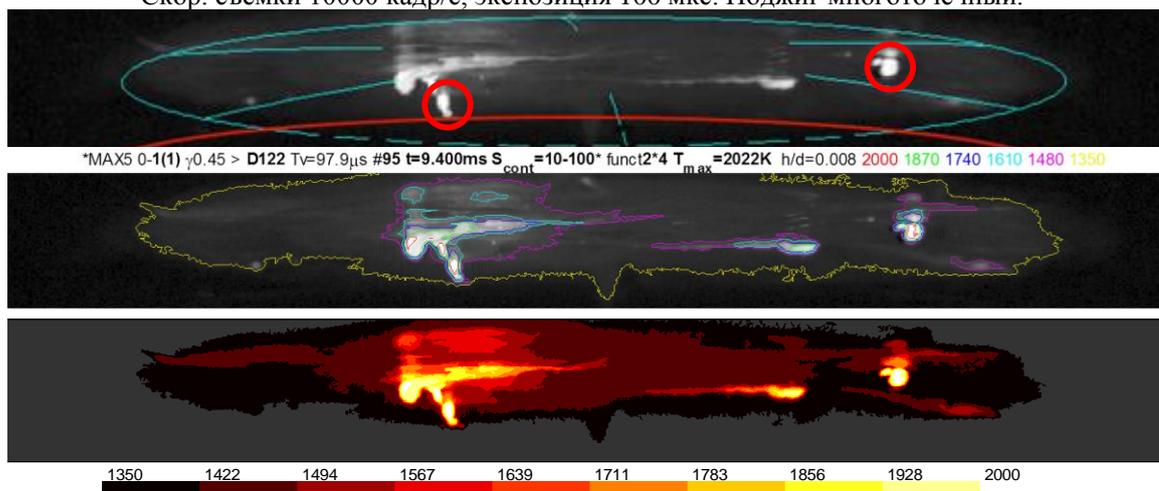


Рисунок 3.6. Часть 2. Фотографии анода в нуле тока и результаты определения температуры. Красными кружками обведены анодные капли.

Как видно из этих результатов, после нуля тока температура поверхности анода сильно неоднородна. На рабочей поверхности анода можно видеть перепады в сотни градусов. Наиболее разогретые части поверхности анода – углы прорезей и остатки гребня. Рельеф остатков гребня может сильно отличаться в различных импульсах. При токах немного меньших предельного тока отключения, гребень в большинстве случаев уже размазан по аноду силами поверхностного натяжения, а при токах, близких к предельным отключаемым, к нулю тока на аноде могут сохраниться выступы большого размера.

Температура большей части поверхности анода медленно растёт с увеличением тока. При амплитудном значении тока  $I_{ампл} \approx 43$  кА температура большей части поверхности не превосходит 1250-1300 К, а при  $I_{ампл} \approx 57$  кА – 1500-1550 К. Максимальное значение температуры (достигаемое на малых участках поверхности) при этом изменении тока тоже растёт с 1450-1550 К до 1900- 2000 К.

Ниже (Рисунок 3.7.) приведены зависимости максимальной температуры поверхности анода  $T_{(пов.)max}$ , максимальной температуры анодных капель  $T_{(кап.)max}$  и максимальной температуры лепестков накладки в зависимости от амплитудного значения тока.

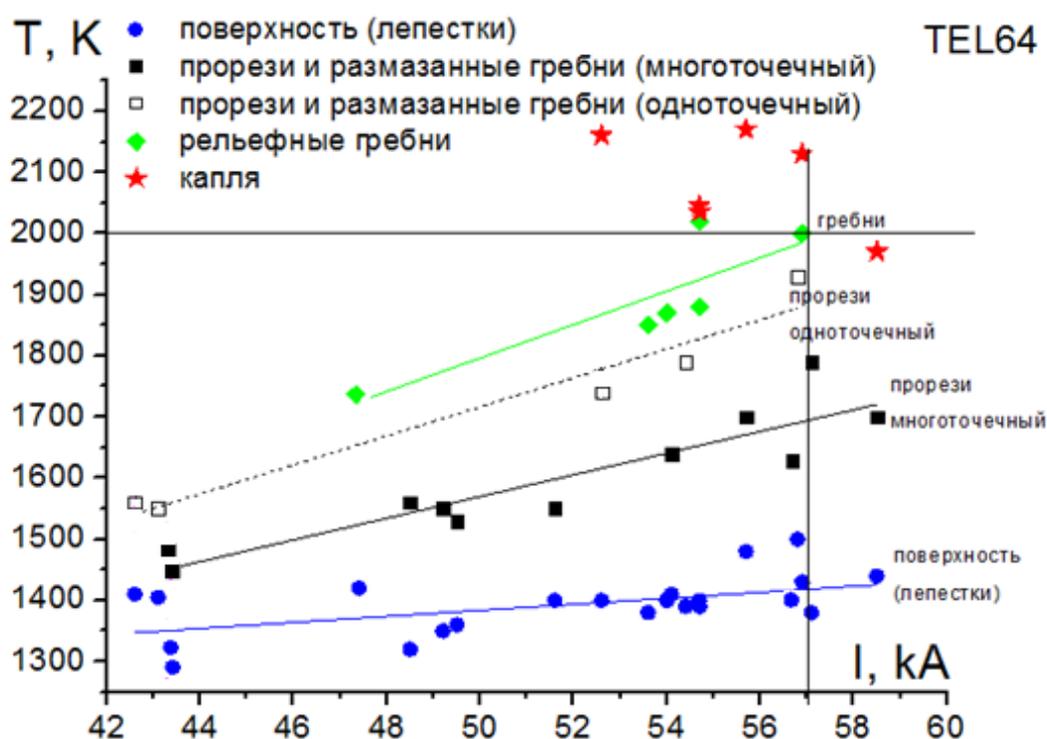


Рисунок 3.7. Максимальные температуры поверхности анода и анодных капель в нуле тока в зависимости от амплитудного значения тока для КС TEL-50.

Как видно, к моменту окончания тока, наиболее разогретые объекты - это капли, оторвавшиеся от поверхности анода. Капли обнаруживаются при протекании токов близких

к предельным отключаемым токам. Температура всех обнаруженных капель превышает 2000 К (за исключением одной, находящейся несколько не в фокусе съемки). Температура большей части поверхности анода (лепестков) сравнительно небольшая (менее 1500 К во всем диапазоне токов) и не слишком быстро растет с током. На поверхности анода в нуле тока наиболее разогреты (более чем на 200-500 К относительно большей части поверхности) края прорезей, а также выступы, оставшиеся от образовавшегося за несколько миллисекунд до окончания тока жидкого гребня. Заметим, что в данной КС температуры прорезей и размазанных гребней в нуле тока в случае одноточечного поджига оказываются примерно на сотню градусов выше, чем в случае многоточечного. Перегрев гребней относительно других частей поверхности анода зависит от истории их образования, которая определяет их форму к концу импульса тока. В некоторых случаях температура гребня оказалась близка к температуре капель. Это наблюдалось в тех случаях, когда гребень сильно выступал относительно поверхности, однако отрыва капли от гребня к нулю тока не произошло (наблюдались случаи, где капля отрывалась от сильно рельефного гребня после прекращения токовой нагрузки).

Из результатов, представленных выше видно, что после протекания тока, близкого по амплитуде к предельному отключаемому данной КС току, на поверхности сравнительно холодного анода могут появляться отдельные фрагменты, температура которых близка или даже несколько превышает 2000 К. Однако размер этих фрагментов мал и они не способны обеспечить выполнение критерия пробоя по параметру  $(n*d)_{crit}$  (см. стр.26). Действительно, если предположить, что перегретый фрагмент - окружность радиусом  $R$ , то концентрация пара по мере удаления от поверхности будет падать по следующему закону [39].

$$n(z) = n(0) \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right)}} \right\}$$

Интеграл по  $z$  от нуля до  $d$  (длина промежутка) даст выражение для  $n * d$ :

$$n * d = n(0)d \left\{ 1 + \frac{R}{d} - \sqrt{\left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right)} \right\}$$

(здесь  $n(0)$  – концентрация насыщенного пара при  $z = 0$ ).

Размеры перегретых до температуры  $\sim 2000$  К областей на поверхности анода по нашим оценкам составляют 1-5мм ( $R/d = 0.1 \div 0.5$ ). При  $R/d = 0.5$  и  $0.1$  интеграл  $\int_0^d n(z)dz$  меньше  $(n * d)_{crit}$  в  $\sim 2.5$  и  $\sim 10$  раз соответственно.

Можно предположить, что именно капли находящиеся в межэлектродном промежутке, являясь объёмным источником металлического пара, и имеющие наиболее высокую температуру ( $>2000$  К), провоцируют пробой восстанавливающимся напряжением. Появление капель (в нуле тока) хорошо коррелирует с достижением предельного отключаемого тока. Также капли в промежутке не обнаруживаются при протекании токов менее 52 кА, которые, по результатам испытаний в «Тавриде Электрик», данная КС гарантированно отключает.

### 3.2.2. КС TEL-50

Ниже приведена выборка из результатов фотографирования поверхности анода через интерференционный фильтр, полученных при испытаниях КС TEL-50 при разных токах вплоть до предельного отключаемого тока  $\sim 42$  кА, а также результаты их обработки (Рисунок 3.8.).

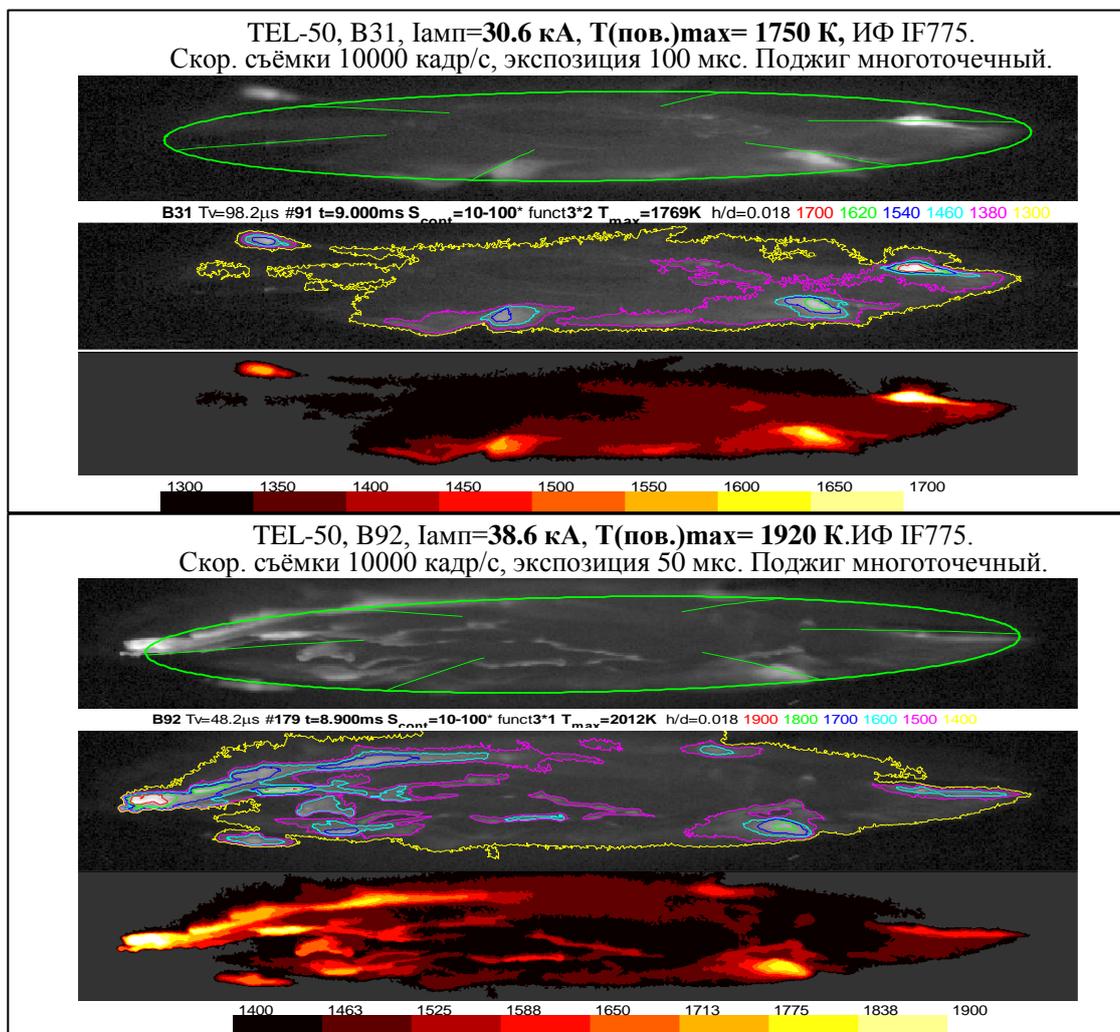


Рисунок 3.8. Часть 1. Фотографии анода в нуле тока и результаты определения температуры.

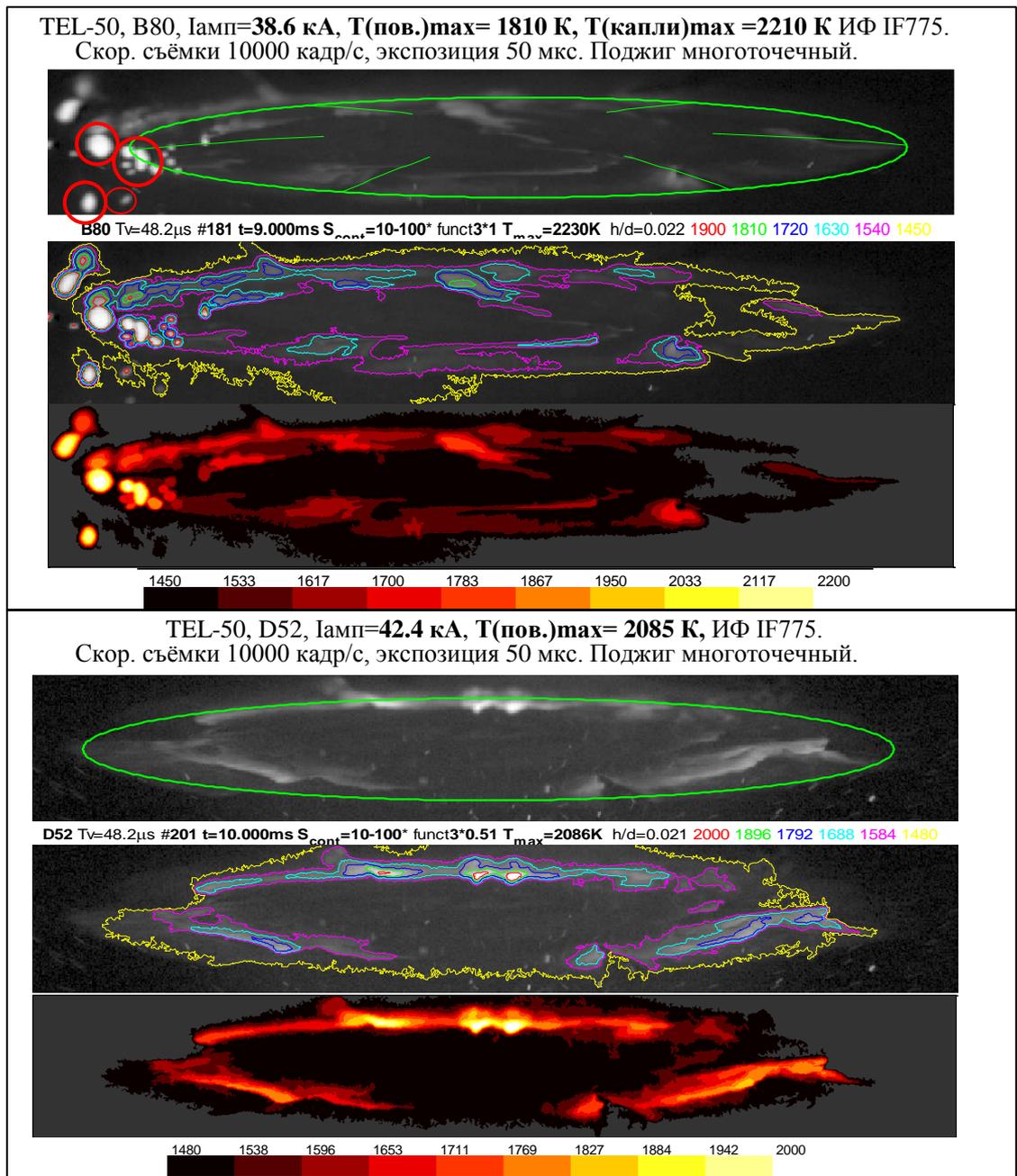


Рисунок 3.8. Часть 2. Фотографии анода в нуле тока и результаты определения температуры. Красными кружками обведены анодные капли.

Как видно из этих результатов, после нуля тока температура поверхности анода сильно неоднородна. Картина схожа с той, что наблюдалась на поверхности анода в КС TEL-64. На фоне относительно темного анода видны небольшие по размеру существенно перегретые участки поверхности - фрагменты анодного гребня и углы прорезей.

Температура большей части поверхности анода медленно растёт с ростом тока. При амплитудном значении тока  $I = 30.6$  кА почти весь торец анода оконтурен изотермой в  $\sim 1300$  К (на Рисунке 3.8., имп. В31, желтая линия ограничивает область, имеющую температуру  $\gg 1300$  К). При амплитуде тока  $I = 42.4$  кА почти весь торец анода оконтурен

изотермой в  $\sim 1500$  К (на Рисунке 3.8., имп. D52, желтая линия ограничивает область, имеющую температуру  $>\sim 1500$  К). Максимальное значение температуры (достигаемое на малых участках поверхности) при этом изменении тока тоже растёт с (1750 – 1850) К до (1950 – 2050) К.

Ниже (Рисунок 3.9) приведены зависимости максимальной температуры поверхности анода  $T_{(пов.)max}$ , температуры наиболее крупных анодных капель и максимальной температуры лепестков накладки в зависимости от амплитудного значения тока. Различие в значениях максимальных температур между случаями одно- и многоточечного поджига в данной КС не прослеживается.

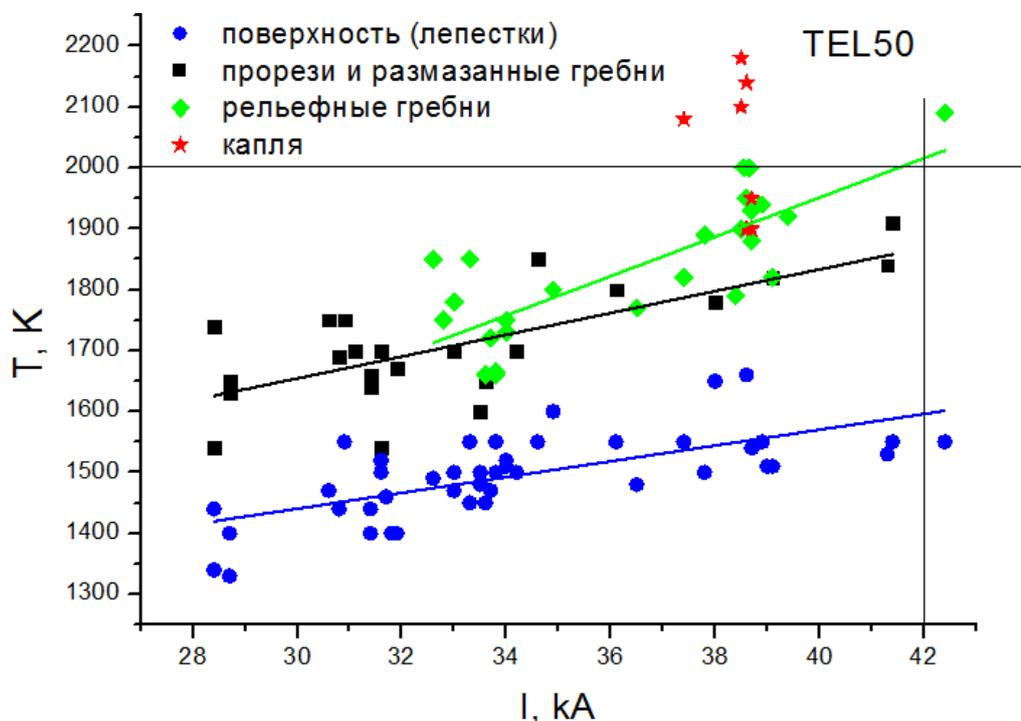


Рисунок 3.9. Максимальные температуры поверхности анода и температуры крупных анодных капель в нуле тока в зависимости от амплитудного значения тока для КС TEL-50.

Как видно из графика (Рисунок 3.9), при токе, близком к предельной отключающей способности, температуры наиболее сильно разогретых фрагментов на поверхности анода достигают значений  $\sim 2000$  К. Однако, как и при испытаниях КС TEL-64, размеры этих фрагментов значительно меньше длины промежутка. Поэтому они не способны обеспечить выполнение критерия пробоя по параметру  $(n \cdot d)_{crit}$  (см. стр.26, 61).

Как и при испытаниях КС TEL-64, наиболее горячими объектами в нуле тока являются капли анодного происхождения (по крайней мере, часть капель). При испытаниях КС TEL-64 появление анодных капель коррелировало с достижением предельного отключаемого значения тока  $I \approx I_L$ . Это позволило нам предположить, что пробой

промежутка восстанавливаемым напряжением КС TEL-64 обусловлен наличием капель анодного происхождения. Напомним, что анодные капли образуются в результате разрушения жидкого гребня. В КС TEL-50 (и TEL-55) образование и разрушение гребня происходит на  $\sim 2$  мс раньше, чем в КС TEL-64. При  $I \approx I_L$  в КС TEL-50 гребень разрушается примерно за  $3.5 \div 4$  мс до нуля тока, и, как правило, его фрагменты (анодные капли) к нулю тока либо возвращаются на анод, либо покидают поле зрения. Потому при испытаниях КС TEL-50 получились существенно другие результаты. В подавляющем большинстве испытаний анодные капли в нуле тока отсутствовали. Анодные капли были обнаружены всего в четырех импульсах. В трёх случаях их было несколько, и температура наиболее крупных из них была определена и приведена на графике (Рисунок 3.9). В одном случае капля была одна.

Интересно отметить, что во всех четырех случаях капли наблюдались в импульсах с амплитудным значением тока  $37 \div 39$  кА. Казалось бы, в данном диапазоне токов будут происходить пробои при приложении ПВН. Однако по результатам испытаний в ПГ «Таврида Электрик» токи до 40 кА данная КС гарантированно отключает. Ответ на вопрос, почему в испытаниях ПГ «Таврида Электрик» не наблюдалось пробоев при токах  $\sim 37-39$  кА, может быть следующим.

Во-первых, наблюдаемые в данной КС анодные капли во всех четырех случаях в нуле тока находились либо на периферии КС, либо уже вне межэлектродного промежутка. В выборке выше был приведен импульс (Рисунок 3.8., имп. D80), наиболее «неблагоприятный» с точки зрения пробоя. В данном импульсе слева от оси можно было видеть множество капель. Самые крупные капли в нуле тока находились вне промежутка. Во всех четырех случаях, где в нуле тока наблюдались анодные капли, максимум температуры поверхности достигался на удаленных от капель участках: наиболее перегретые участки поверхности (рельефные гребни в трех случаях и прорезь в одном) находились в диаметрально противоположной части анода. Часть поверхности анода, находящаяся вблизи капель, во всех случаях имела сравнительно низкую температуру (от 1500 до 1700 К). Данное обстоятельство и то, что капли находились на периферии КС (а в большинстве случаев вне промежутка), по-видимому, не способно обеспечить необходимую для пробоя концентрацию металлического пара.

Во-вторых, появление анодных капель в наших экспериментах – редкость. Даже в указанном выше интервале токов  $37 \div 39$  кА вероятность появления капель составляла не более 20% (по результатам всех исследований, в. т. ч. процессов на аноде в дуге и процессов

на катоде). Т. о. при испытаниях КС TEL-50 в «Тавриде электрик» не наблюдалось пробоев при токах до ~40 кА по причине возможного отсутствия анодных капель в нуле тока.

При увеличении тока свыше 39 кА анодных капель в момент погасания разряда ни разу не наблюдалось. Это, по-видимому, связано с тем, что при больших токах, отрыв анодных капель от гребней происходит раньше (о чем говорилось в предыдущем параграфе).

Т. о., причиной пробоя в КС TEL-50 (в отличие от TEL-64) не являются анодные капли. Что в таком случае приводит к пробую?

Для КС TEL-50 при  $I > \sim 39$  кА в нуле тока на большинстве съёмок в промежутке видно множество мелких капель. От импульса к импульсу их количество различно и в среднем увеличивается с ростом амплитуды тока (например, Рисунок 3.10.) Проследивая поведение мелких капель в последующих после окончания разряда кадрах, можно видеть, что они летят со стороны катода. В дальнейшем их будем именовать катодными каплями.

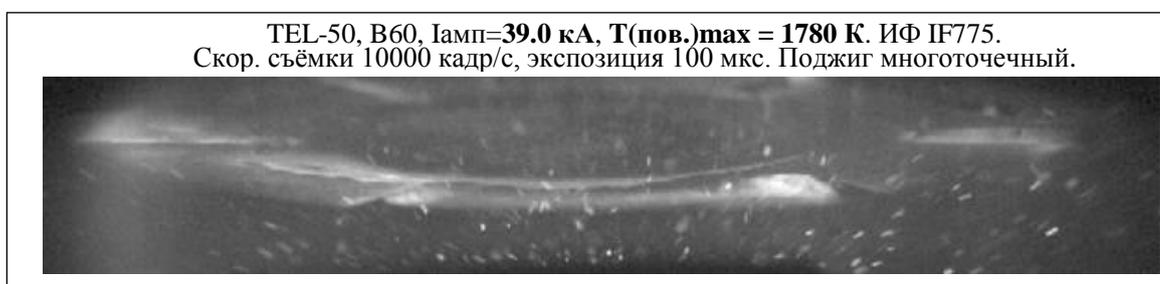


Рисунок 3.10. Фотография анода в нуле тока.

При токах порядка предельных отключаемых данной КС после погасания дуги наблюдается большое число капель, летящих со стороны катода. Это позволяет предположить, что пробой в КС TEL-50 вызывают катодные капли, локально увеличивая концентрацию пара в промежутке.

Отметим, что при испытаниях КС TEL-64 ни разу капли со стороны катода в нуле тока не наблюдались. Для того чтобы понять причину появления катодных капель в КС TEL-50 и отсутствия таковых в КС TEL-64 были проведены исследования процессов на катоде, о чем будет описано ниже в соответствующем параграфе.

### 3.2.3. КС TEL-55

Ниже приведена выборка из результатов фотографирования поверхности анода через интерференционный фильтр, полученных при испытаниях КС TEL-55 при разных токах вплоть до предельного отключаемого тока ~ 45 кА и несколько больше, а также результаты их обработки (Рисунок 3.11.). Как видно из этих результатов, после нуля тока температура поверхности анода сильно неоднородна. Картина сходна с той, что наблюдалась на

поверхности анода КС TEL-64 и КС TEL-50. На фоне относительно холодного анода видны небольшие по размеру существенно перегретые участки поверхности. Это фрагменты анодного гребня и углы прорезей.

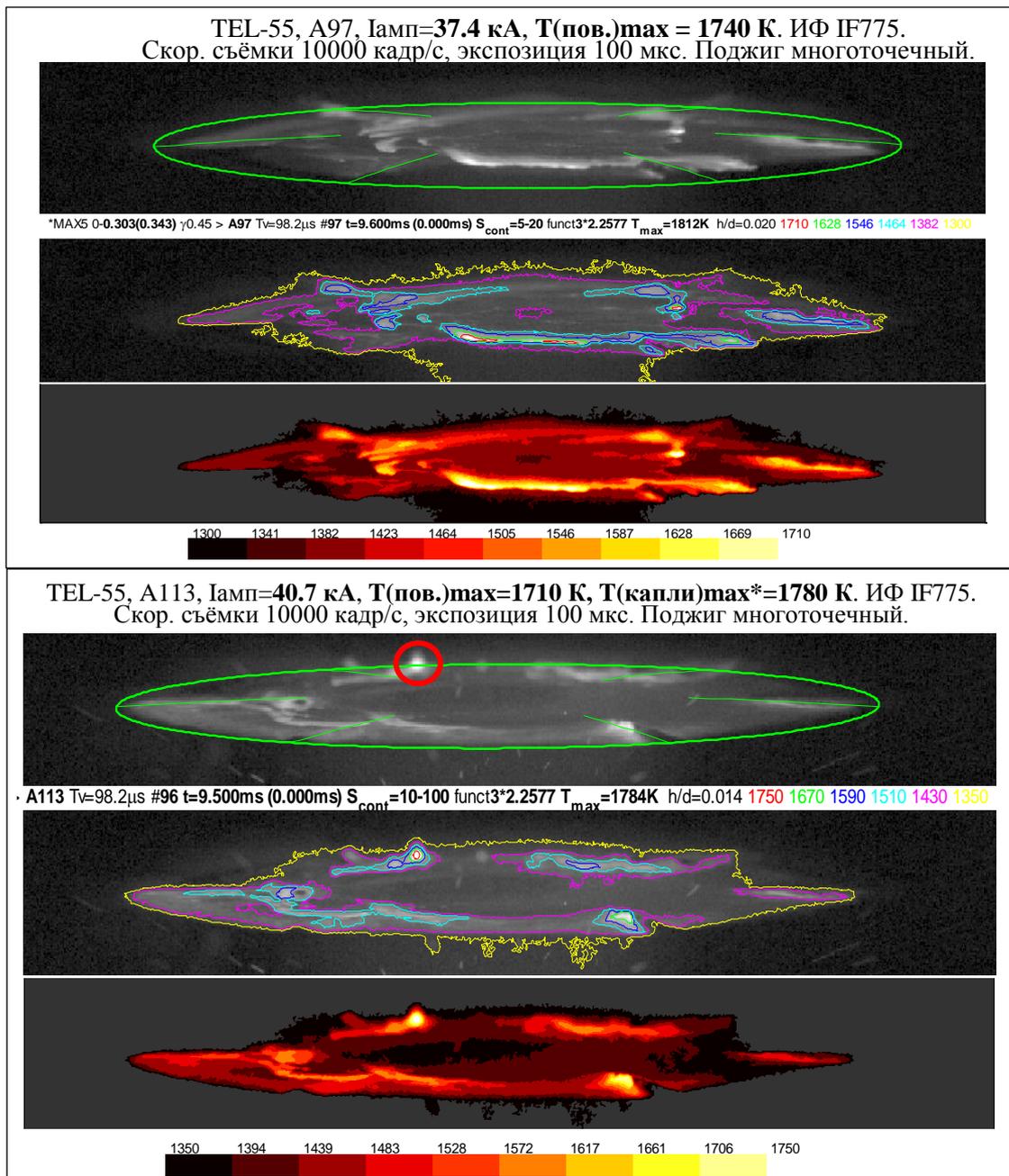
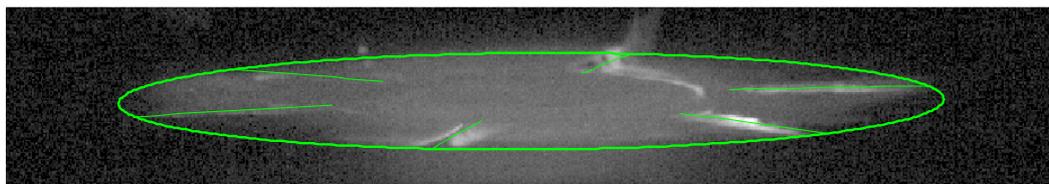
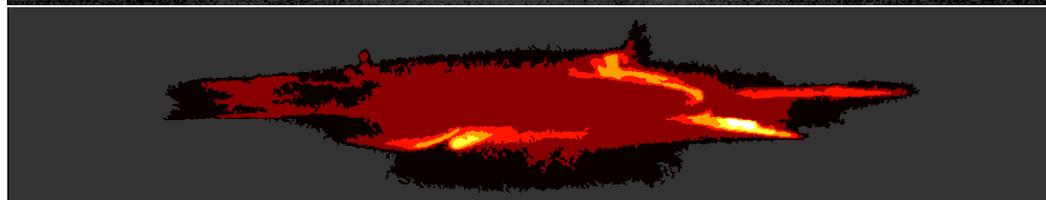
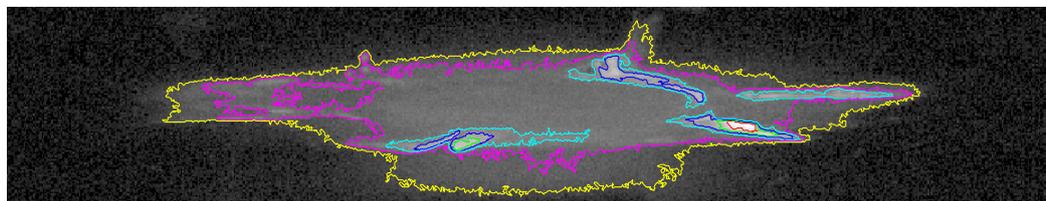


Рисунок 3.11. Часть 1. Фотографии анода в нуле тока и результаты определения температуры. Красным кружком обведена анодная капля.

TEL-55, A38, I<sub>амп</sub>=42.1 кА, T(пов.)<sub>max</sub> = 1680 К. ИФ IF775.  
 Скор. съёмки 10000 кадр/с, экспозиция 100 мкс. Поджиг многоточечный.

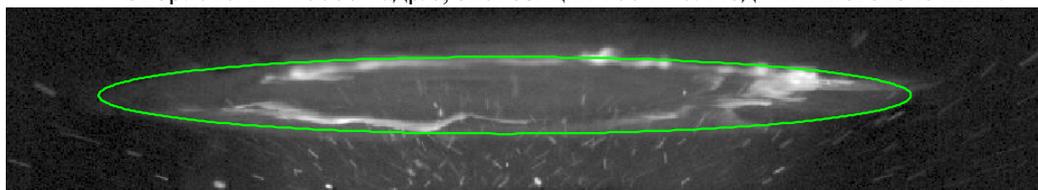


\*MAX5 0-0.0993(0.104) γ0.45 > A38 T<sub>v</sub>=98.2μs #88 t=8.700ms (0.000ms) S<sub>cont</sub>=10-100\* funct3\*1.156 T<sub>max</sub>=1720K h/d=0.008 1650 1590 1530 1470 1410 1350

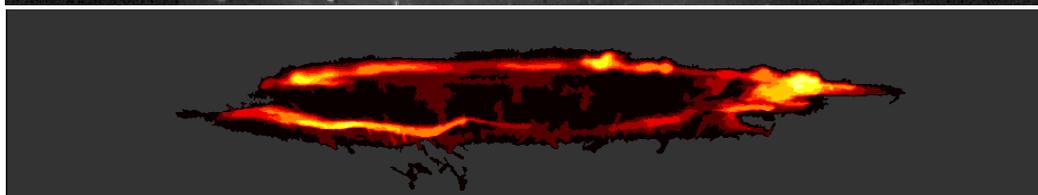
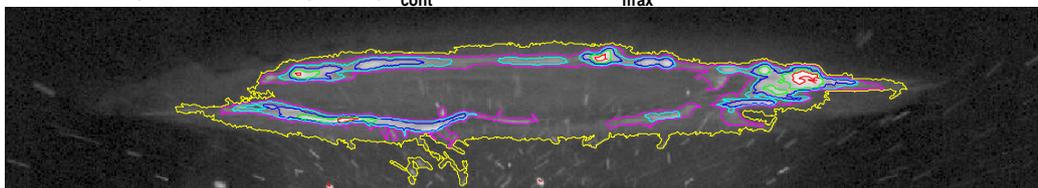


1350 1410 1470 1530 1590 1650

TEL-55, A51, I<sub>амп</sub>=47.9 кА, T(пов.)<sub>max</sub> = 1905 К. ИФ IF775.  
 Скор. съёмки 10000 кадр/с, экспозиция 100 мкс. Поджиг многоточечный.



• A51 T<sub>v</sub>=98.2μs #117 t=11.600ms (0.000ms) S<sub>cont</sub>=10-100\* funct3\*1.156 T<sub>max</sub>=1907K h/d=0.010 1850 1774 1698 1622 1546 1470



1470 1518 1566 1613 1661 1709 1757 1804 1852 1900

Рисунок 3.11. Фотографии анода в нуле тока и результаты определения температуры.

Температура большей части поверхности анода медленно растёт с ростом тока. При амплитудном значении тока  $I \approx 37$  кА почти весь торец анода оконтурен изотермой в  $\sim 1300$  К (на Рисунке 3.11., имп. A97, желтая линия ограничивает область, имеющую температуру  $\gg 1300$  К). При амплитуде тока  $I \approx 48$  кА почти весь торец анода оконтурен изотермой в  $\sim 1500$  К (на Рисунке 3.11.Рисунок 3.11., имп. A51, желтая линия ограничивает

область, имеющую температуру  $\sim 1475$  К). Максимальное значение температуры (достигаемое на малых участках поверхности) при этом изменении тока тоже растёт с 1700 – 1850 К до 1900 К.

Отметим, что вблизи нуля тока анодных капель в промежутке нет, в том числе и при токах, превосходящих предельный отключаемый ток. Из нескольких десятков испытаний был лишь один случай, когда в промежутке была обнаружена небольшая анодная капля, которая к моменту погасания разряда находилась вне промежутка (Рисунок 3.11., имп А113).

В то же время, при токах  $I \sim 40$  кА в нуле тока в промежутке видны катодные капли. С ростом тока их количество постепенно растёт и при  $I \sim 44 - 45$  кА катодных капель в промежутке становится достаточно много (например, имп. А51, Рисунок 3.11.).

Ниже (Рисунок 3.12.) приведены зависимости максимальной температуры поверхности анода  $T_{(пов.)max}$ , температуры наиболее крупных анодных капель и максимальной температуры лепестков накладки в зависимости от амплитудного значения тока. Как и в КС TEL-50, различие в значениях максимальных температур между случаями одно- и многоточечного поджига в данной КС не прослеживается.

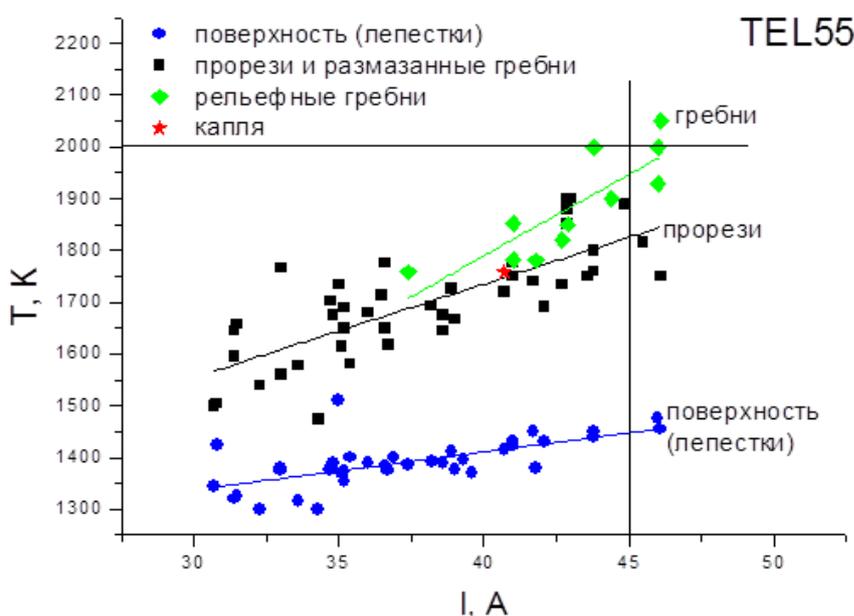


Рисунок 3.12. Максимальные температуры поверхности анода и температуры крупных анодных капель в нуле тока в зависимости от амплитудного значения тока для КС TEL-55.

Видно, что при токе, близком к предельной отключающей способности, температуры наиболее сильно разогретых фрагментов достигают значений 1900÷2000 К. Однако, как и при испытаниях предыдущих двух КС, размеры этих фрагментов значительно меньше длины промежутка. Поэтому они не способны обеспечить выполнение критерия пробоя по параметру  $(n*d)_{crit}$  (см. стр.26, 61, 64).

Мы, как и в случае с КС TEL-50 приходим к выводу, что причиной пробоя в КС TEL-55 при приложении ПВН в подавляющем большинстве случаев являются катодные капли. Резкое увеличение количества катодных капель в промежутке происходит как раз при токах, близких по амплитуде к предельному отключаемому данной КС току  $\sim 45$  кА.

Для установления причины появления катодных капель в нуле тока были проведены исследования процессов на катоде, о чем будет написано ниже. Прежде чем перейти к рассмотрению результатов исследования процессов на катоде, рассмотрим процессы остывания анода.

### 3.3. Остывание анода

Настоящие эксперименты показали, что при исследовании процесса остывания анода и анодных капель необходимо проследить температуры движущихся источников излучения. Для этого в пакете Matlab была создана программа, которая позволяла покадрово двигаться за максимумом излучения (температуры) интересующего нас объекта. Под температурой объекта также понимается изотемпературная линия, оконтуривающая 5 пикселей изображения (что соответствует площади на поверхности анода  $\sim 1$  мм<sup>2</sup>). Напомним, что в режимах съемки с использованием ИФ сигнал камеры начинает «тонуть» в шуме при температуре поверхности  $< \sim 1250$  К, т.е. остывание удастся проследить до температуры 1250 К.

Остывание анода рассмотрим на примере КС TEL-64. Проследим остывание оторвавшихся от анода капель (1) и различных наиболее разогретых участков поверхности: рельефных гребней (2), размазанных гребней (3); углов прорезей (4); а также относительно холодных частей поверхности анода – лепестков (5). Остывание проследим на протяжении времени  $\sim 10$  мс, в течение которого при отключении данной КС предельного тока при приложении ПВН происходит подавляющее число пробоев (по данным ПГ «Таврида Электрик»).

Ниже (Рисунок 3.13.) для каждого типа объектов приведены две кривые. Видно, что для объектов одинакового типа кривые близки, но кривые остывания объектов разного типа имеют разную форму. Кривые пронумерованы в соответствии с номерами, присвоенными разным типам объектов. Энергия при остывании уносится из разогретых частей анода за счёт излучения, испарения и теплопроводности. Результаты, приведённые на Рисунке 3.16., показывают, что медленнее всего остывают капли, оторвавшиеся от поверхности анода, т.к. они остывают только за счёт излучения и испарения.

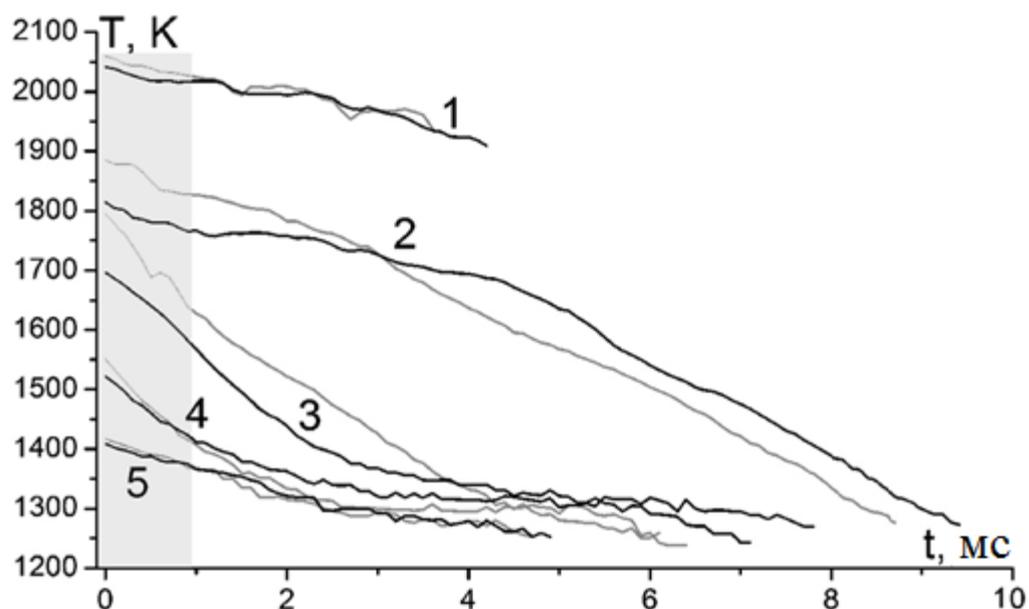


Рисунок 3.13. Кривые остывания капель и различных участков поверхности анода. 1 – капли; 2 – рельефные гребни; 3 – размазанные гребни; 4 – углы прорезей; 5 – лепестки. Область, отмеченная серым, соответствует интервалу времени, в котором происходит 90% пробоев.

Средняя скорость остывания рельефных гребней больше, чем скорость остывания капель, т.к. гребни имеют тепловой контакт с поверхностью. Тепловой контакт с поверхностью электрода размазанных гребней лучше, чем рельефных, и потому они остывают ещё быстрее. Примерно также или несколько быстрее остывают углы прорезей. Однако как тепловой контакт с поверхностью электрода, так и градиент температуры для разных объектов могут сильно различаться. Соответственно будут различаться и скорости потери энергии. Это и определяет большое различие форм кривых остывания. Особенно сильно отличаются формы кривых, соответствующих объектам типа 2 и типов 3, 4, 5. Это объясняется тем, что кривые 2 показывают остывание выступающих от поверхности объектов, теплоотвод от которых отличается от теплоотвода плоских объектов.

Как это было видно выше (Рисунок 3.13.) скорость изменения температуры некоторого объекта со временем может сильно изменяться. Изменения скорости может быть вызвано различными причинами.

Вначале рассмотрим изменения, вызываемые движением объекта, которое, как показывают результаты фотографирования, сопровождается изменением его формы. Кроме того, из-за движения расплава объект смещается с одного участка поверхности на другой, температура которого может отличаться от температуры предыдущего. Эти изменения происходят на начальном участке кривых остывания, пока движение объекта по инерции не прекратилось.

Сопоставим изменение формы растекающихся по аноду частей гребня с кривыми их остывания (Рисунок 3.14.). Отметим, что во всех импульсах, где присутствуют рельефные гребни, имеет место изменение их формы. Для размазанных гребней изменение формы не столь характерно, однако встретилось в ряде случаев и показано для полноты картины на Рисунке 3.14.. Справа на Рисунке 3.14. приведены начальные участки кривых остывания рельефного и размазанного гребней. Вертикальными линиями отмечены интересные для сопоставления со съемкой поверхности моменты времени. Для этих же моментов времени приведена выборка кадров из результатов фотографирования поверхности анода.

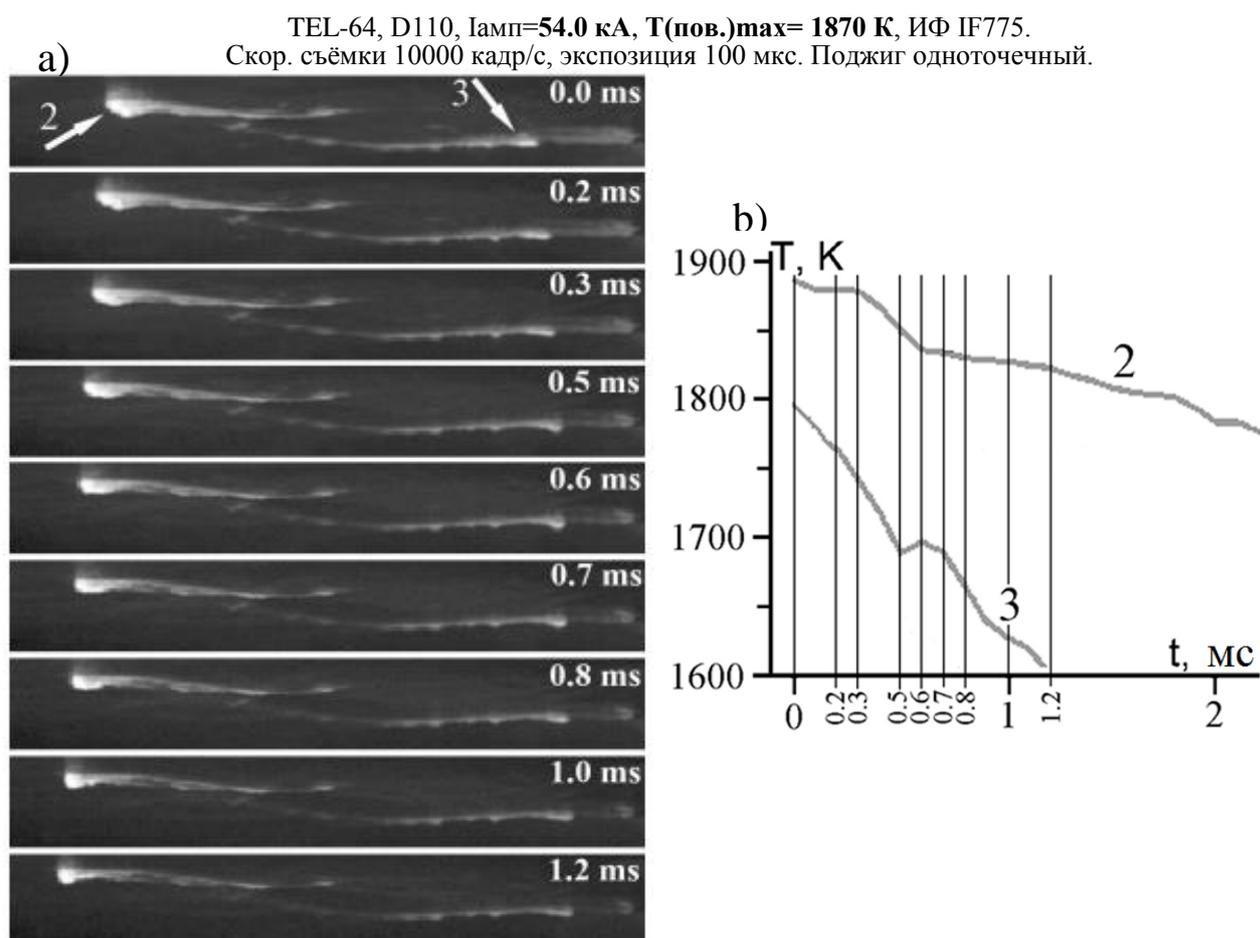


Рисунок 3.14. Результаты обработки фотографий анода после нуля тока  $I = 54.0 \text{ кА}$ . а – выборка кадров из результатов фотографирования анода (в правом углу указано время после нуля тока), б - фрагменты кривых остывания рельефного гребня (2) и размазанного гребня (3).

Рассмотрим изменения, происходящие по мере остывания рельефного гребня (Рисунок 3.14., а, отмечен цифрой 2). Видно, что с  $t=0$  (нуль тока) по  $t=0.3 \text{ мс}$  гребень заметно выступал. Гребень двигался, и форма его после  $t=0.3 \text{ мс}$  стала заметно меняться. Он начал уплощаться. Соответственно изменилась и скорость его остывания, как это видно из Рисунок 3.14., б (кривая 2). Более плоский объект стал остывать быстрее. После  $t=0.6 \text{ мс}$

форма гребня снова начала меняться, он начал выступать (Рисунок 3.14.,а). Изменение формы вызвало замедление остывания (Рисунок 3.14., b).

На этом же рисунке можно проследить изменения, происходящие с размазанным гребнем. В нуле тока он был плоским (Рисунок 3.14., а, отмечен цифрой 3) и остывал быстро (Рисунок 3.14., b, кривая 3). Однако при  $t=0.5$  мс форма гребня меняется, гребень начинает выступать (Рисунок 3.14., а.). Изменяется и скорость остывания – она уменьшается (между  $t=0.5$  мс и  $t=0.6$  мс температура объекта даже несколько возрастает, почти на 10 К, однако это находится в пределах погрешности наших измерений) (Рисунок 3.14., b.). При  $t=0.7$  мс фрагмент гребня опять начинает уплощаться и остывание ускоряется. Как видим, в обоих рассмотренных примерах существует корреляция между формой объекта (которая определяет теплоотдачу в «тело» анода) и скоростью остывания.

Теперь рассмотрим отличие кривых остывания различных объектов связанное, по-видимому, с процессом их солидификации. Кривые остывания объектов типа 3, 4 и 5 при температуре 1300÷1350 К имеют участок, близкий к плато (температура практически не меняется со временем), а на кривых остывания объектов типа 2 плато явно нет (см. Рисунок 3.13.).

Возможное объяснение состоит в том, что температура объектов типа 3, 4 и 5 даже в процессе горения дуги не достигала температуры плавления хрома (2130 К), хромовые гранулы оставались нерасплавленными в расплавленной меди. Застывание меди при охлаждении до температуры 1356 К привело к образованию наблюдавшегося нами на кривых типа 3, 4 и 5 плато. Можно предположить, что объекты типа 2 образовались из расплава меди и хрома, температура которого в процессе горения дуги превосходила температуру плавления хрома. Солидификация такого расплава, в котором перемешаны жидкие хром и медь, согласно [10], происходит в широком диапазоне температур 1356÷1673 К, что и обуславливает отсутствие выраженного плато на кривых остывания. Отметим, что, как и в работах [5, 6, 8, 9, 30, 31], в которых плато на кривых остывания было обнаружено, так и в работе [10], исследования остывания анода проводились с помощью серийных пирометров, которые не обеспечивают пространственное разрешение. Измерения остывания с пространственным разрешением впервые выполнено в настоящей работе. Эти измерения показывают, что формы кривых остывания для разных перегретых частей поверхности анода могут сильно различаться. После протекания тока  $I \sim I_L$  на аноде спустя даже ~10 мс остаются области поверхности небольшого размера, разогретые до температуры близкой к температуре плавления меди.

Отметим, что исследование процесса остывания анода в настоящей работе проводилось без приложения ПВН. Открытым и интересным остается вопрос о поведении жидких фрагментов гребня и кривых остывания при приложенном напряжении после погасания разряда. Быть может, в режимах, где не выполняется критерий  $(n*d)_{crit}$ , пробои могут быть спровоцированы оставшимися на поверхности фрагментами жидкого металла.

Напомним, что согласно [35, 36], если концентрация паров заметно ниже критической, то важную роль в возникновении пробоя в таких условиях играют поверхностные явления. Авторами [35, 36] наблюдались пробои (происходящие, как правило, с задержкой) на медных электродах, спровоцированные образующимися в сильных полях выступами жидкого металла. Однако при использовании медь-хромовых контактов пробоев, вызванных явлениями на поверхности, авторами [35, 36] не наблюдалось.

### 3.4. Процессы на катоде

Как показали результаты эксперимента, описанные в п. 3.2., в КС TEL-50 и TEL-55 при протекании токов порядка предельных отключаемых, после погасания разряда в промежутке видно множество капель, летящих со стороны катода. Для установления причины их появления были проведены исследования процессов на катоде. В данном параграфе будут представлены результаты фотографирования поверхности катода КС TEL-50 и КС TEL-64 (в которой капля в нуле тока мы ни разу не наблюдали).

Для определения температуры поверхности катода были выполнены фотосъёмки с интерференционным фильтром. Фотосъёмки катодной поверхности КС TEL-50 показали, что в сильноточных режимах через  $2.2 \div 2.8$  мс от момента поджига разряда катодная привязка симметризуется и охватывает всю плоскую часть катода (по диаметру  $D_2$ , Таблица 2). После этого дуга управляется магнитным полем. Это время вполне согласуется с полученным расчётным путём временем, которое требуется для установления сплошного покрытия катода магнитным полем с индукцией  $B_z > 4$  мТл/кА (стр. 47, Рисунок 2.17.).

Анализ результатов эксперимента показал, что в сильноточных режимах приосевая часть поверхности катода в процессе горения дуги плавится, но при токах  $I < \sim 39$  кА к нулю тока оплав затвердевает. Это видно при рассмотрении фотосъёмки (Рисунок 3.15.). Действительно, после нуля тока (после 10-й мс) на катоде видны следы оплава, который произошёл во время горения дуги, однако поверхность катода после нуля тока не светится. Это означает, что её температура ниже  $\sim 1250$  К. Слабая подсветка в нижней левой части кадра (благодаря которой удаётся увидеть структуру поверхности катода) – отражение

излучения горячих анодных капель. Факт плавления катода подтверждает также и фотография, сделанная после испытаний (Рисунок 3.16., слева). Ток в этой части испытаний не превосходил 38.6 кА. Подчеркнём, что при токах  $I < \sim 39$  кА в нуле тока капель, летящих со стороны катода, мы не наблюдали. Видимые на Рисунке 3.15. яркие точки вблизи нуля тока летят в сторону катода.

Множество катодных капель (вернее сказать световых дорожек, оставленных каплями) можно видеть на кадрах в моменты времени, предшествующие нулю тока. Такой кадр показан на Рисунке 3.15., момент времени  $t=9.1$  мс (некоторые капли обведены в желтый кружок). Однако к нулю тока катодные капли вылетают за пределы промежутка и не попадают в поле зрения камеры. По-видимому, капли эмитировались катодом тогда, когда поверхность катода еще не затвердела.

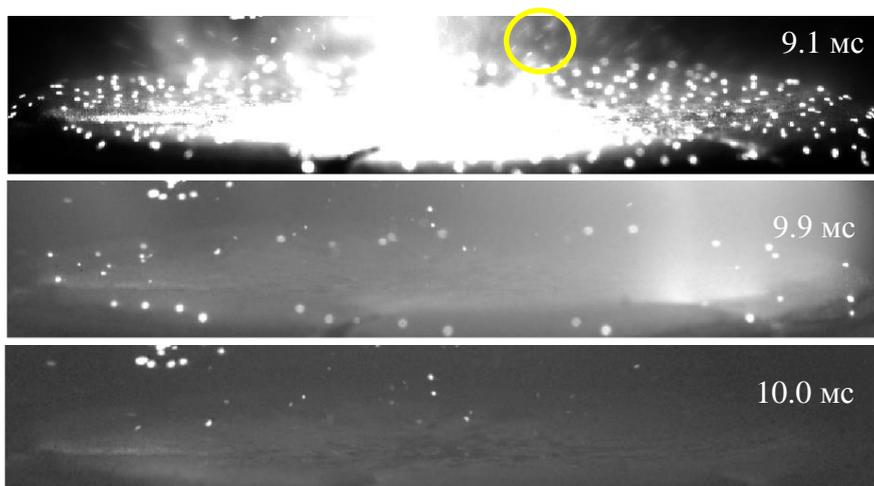


Рисунок 3.15. Выборка фотографий катода TEL-50 вблизи нуля тока.  $I=38.6$  кА. Желтым кружком обведены некоторые катодные капли.



Рисунок 3.16. Фотография катода TEL-50 после протекание тока амплитудой 38.6 кА(слева) и 40.8 кА (справа).

При относительно небольшом увеличении тока (на 2 кА до тока 40.8 кА) ситуация меняется. Как это видно из Рисунка 3.17., при таком токе вблизи нуля тока в промежутке со стороны катода летят многочисленные капли. Когда дуга погасает, они становятся хорошо видны. В момент погасания разряда видно, что небольшая часть поверхности катода вблизи оси остаётся не затвердевшей. Её температура выше 1350 К. Фотография катода после импульса амплитудой 40.8 кА приведена выше (Рисунок 3.16., справа).

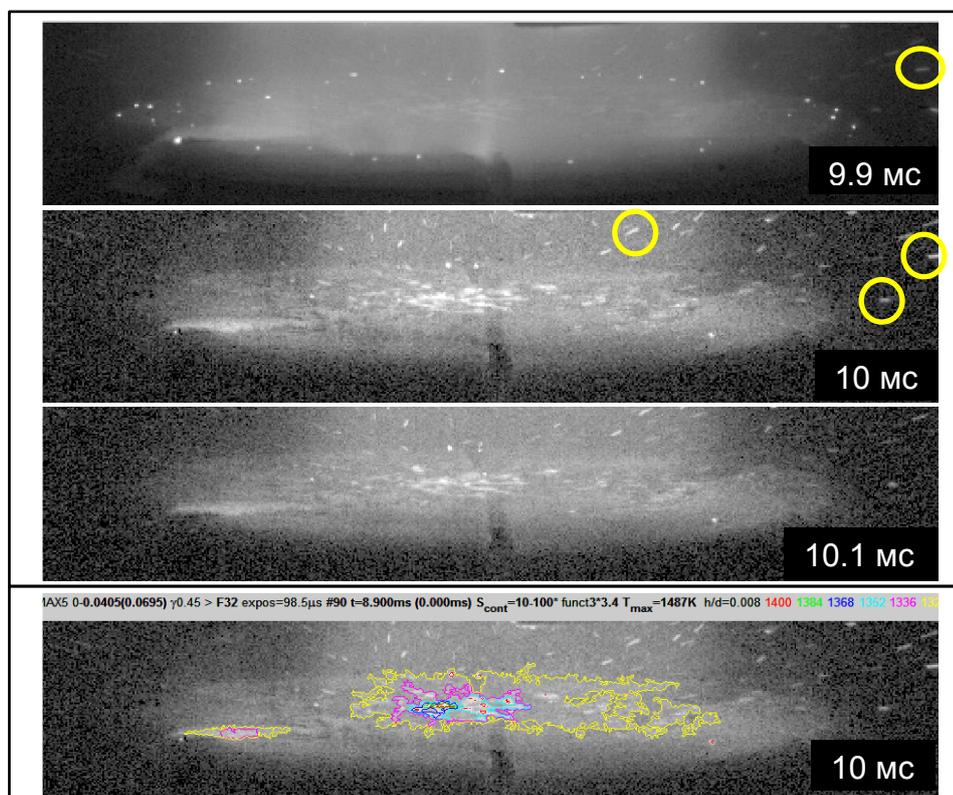


Рисунок 3.17. Сверху - выборка фотографий катода TEL-50 вблизи нуля тока.  $I=40.8$  кА. Желтыми кружками обведены некоторые катодные капли. Снизу – результат определения температуры катода в нуле тока.

При увеличении тока до 42 кА в промежутке в нуле тока катодных капель становится очень много (Рисунок 3.18.). Большая часть поверхности катода в момент погасания разряда расплавлена. Температура небольших участков поверхности катода (в приосевой области) достигает  $\sim 1750$  К.

Анализ результатов фотографирования показывает, что есть быстрые катодные капли, изображения которых вытянуты, но иногда встречаются и медленные. Медленные капли обычно крупнее быстрых. Медленная катодная капля обведена в желтый кружок на Рисунке 3.18.. Оценка скорости (снизу, т.к. неизвестна компонента скорости, перпендикулярная плоскости изображения) наиболее быстрых катодных капель составляет  $\sim 1.5 \cdot 10^3$  см/с. При таких скоростях, капля пролетает расстояние  $\sim$ см за время  $\sim$ мс. Оценка скорости медленных катодных капель составляет  $\sim 3 \cdot 10^2$  см/с, что близко к скорости анодных капель.

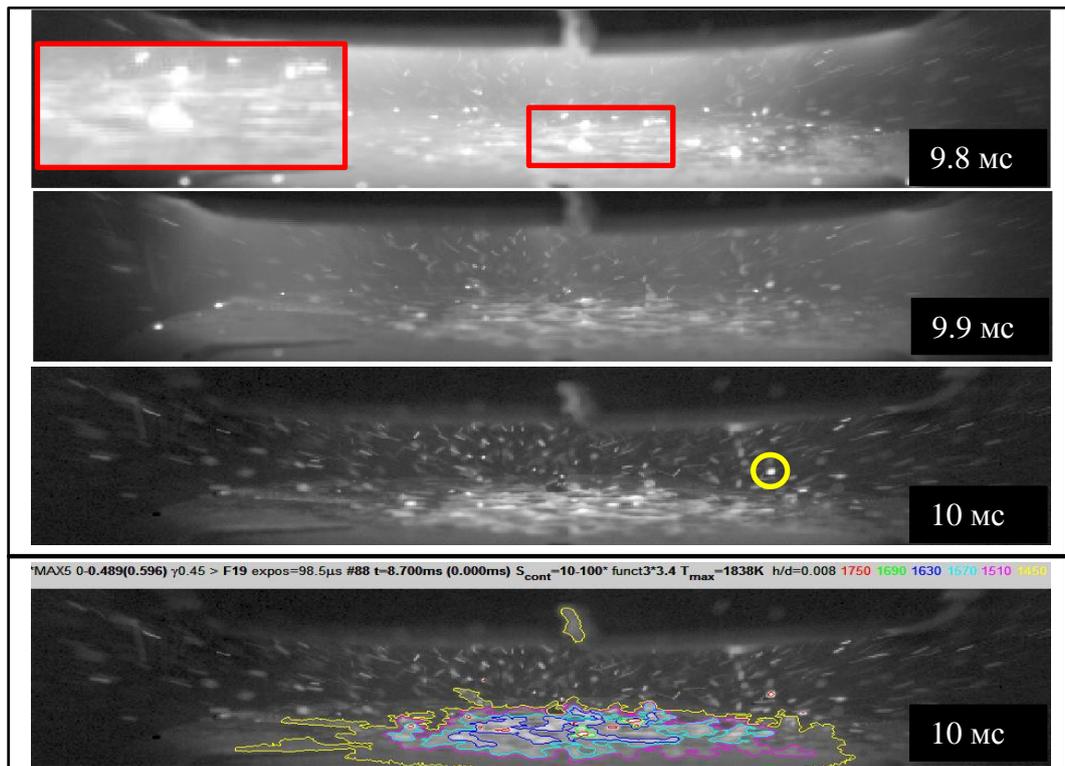


Рисунок 3.18. Сверху - выборка фотографий катода TEL-50 вблизи нуля тока.  $I=42$  кА. Желтыми кружками обведена медленная катодная капля. На первом кадре увеличен участок поверхности, где видны яркие КП. Снизу - результат определения температуры катода в нуле тока.

Одной из возможных причин появления видимых нами катодных капель является горение катодного пятна на расплавленном электроде. Действительно, на сегодняшний день хорошо изученными являются КП, горящие на холодных поверхностях. В частности, установлено [18], что капли, генерируемые такими пятнами, летят под малыми углами к поверхности катода (в отличие от наблюдаемых нами), подавляющее большинство капель имеет размер 1-10 мкм (в наших условиях съемки такие капли мы не способны разрешить). К тому же, такие капли имеют достаточно большие скорости (порядка  $10^4$  см/с), и покидают промежуток за времена менее 100 мкс, (а потому уже через несколько кадров после нуля тока мы бы не наблюдали катодных капель, генерируемых КП, горящем на холодной поверхности).

Таким образом, описанные выше результаты эксперимента показывают, что летящие со стороны катода капли возникают тогда, когда имеет место оплавление поверхности катода. До токов  $\sim 39$  кА поверхность катода к нулю тока твердеет, потому вблизи нуля тока катодные капли не эмитируются, а эмитированные ранее успевают к нулю тока покинуть промежуток. При токах  $\sim 41-42$  кА поверхность катода к нулю тока не успевает затвердеть. Как следствие, в нуле тока на снимках видно много катодных капель. Эти капли, скорее всего, эмитируются незадолго до погасания разряда и к нулю тока, не успевая покинуть промежуток, вызывают

пробой при приложении ПВН. Действительно, предельный отключаемый КС TEL-50 ток как раз составляет 42 кА.

Открытым остается вопрос о температуре катодных капель. Температуру катодных капель мы измерить не можем, т.к. их размер мал. Оценкой снизу может быть температура поверхности катода в момент погасания разряда, которая при токах  $\sim 42$  кА составляет  $\sim 1750$  К (такова максимальная температура небольших участков расплава на катоде вблизи нуля тока). Такая температура катодных капель обеспечивала бы сравнительно низкую скорость испарения материала, в отличие от анодных капель (которые отрываются от жидкости, разогретой до  $T \sim 2000$  К, и потому скорость испарения с их поверхности велика, они увеличивают концентрацию пара в промежутке).

Однако, на некоторых кадрах съемок (например, Рисунок 3.18., первый кадр) видно, что на участках поверхности, с которых, вероятно, эмитируются катодные капли, горят КП. Это значит, что эти малые участки поверхности сильно разогреты. Поэтому нельзя исключить, что температура эмитированных капель высокая, и они интенсивно парят.

Также отметим достаточно интересный факт. В импульсах при сравнительно небольших амплитудах тока, (когда к нулю поверхность катода сравнительно холодная), перед погасанием разряда КП существуют только на периферии катода (это было обнаружено и объяснено в [28]). При увеличении амплитуды тока и наличии к моменту погасания разряда в приосевой области катода расплава, КП вплоть до нуля тока не исчезают из приосевой области и горят на расплаве. На снимках такие катодные пятна, как правило, оказываются ярче тех, что горят на периферии электрода.

Напомним, что при исследовании КС TEL-64 в нуле тока капель, летящих со стороны катода при токах вплоть до предельно отключаемых, нами не наблюдалась. При сравнении состояния катодов TEL-50 и TEL-64 после воздействия токами порядка предельных отключаемых (Рисунок 3.19.), не удивляет факт, что с катода КС TEL-50 капли летели, а с катода КС TEL-64 – нет.

В ходе исследований процессов на катоде КС TEL-64 нам все же удалось зафиксировать режимы, в которых в нуле тока обнаруживаются катодные капли. Это режимы с амплитудами тока более  $\sim 60$  кА, что на несколько килоампер больше предельных отключаемых. Однако, даже при токах  $\sim 60$  кА количество катодных капель в промежутке в нуле тока сравнительно мало, а поверхность катода в целом достаточно холодная.



Рисунок 3.19. Слева - фотография катода TEL-50 после 2-х импульсов амплитудой  $\sim I_L = 42$  кА.  
Справа - фотография катода TEL-64 после 3-х импульсов амплитудой  $\sim I_L = 57$  кА.

Ниже (Рисунок 3.20.) показан кадр съемки катода TEL-64 при токе  $\sim 60$  кА в момент погасания разряда. Видно, что большая часть катода сравнительно темная (катод отражает излучение анода и ярких анодных капель). Святятся на катоде лишь небольшие области поверхности в приосевой части.



Рисунок 3.20. Фотография катода TEL-64 в нуле тока.  $I = 59.9$  кА.

Почему в КС TEL-64 катодные капли (появление которых мы однозначно связываем с оплавом катода) обнаруживаются при токах ( $\sim 60$  кА), несколько больших предельных отключаемых, а в КС TEL-50 – при токах ( $\sim 39$  кА), меньших предельных отключаемых? Для ответа на этот вопрос, вообще говоря, нужно учитывать динамику дуги в этих КС (которая определяется, в том числе, генерируемым КС АМП), нужно связать эту динамику с тепловыми нагрузками на электроды. Предположим, что токовая привязка к электродам имеет диаметр, равный диаметру части поверхности, покрытой полем  $B_z > 4$  мТл/кА. Тогда получается, что в КС TEL-50 катодные капли обнаруживаются (в нуле тока) в режимах с плотностью тока более  $\sim 3.4$  кА/см<sup>2</sup>, а в КС TEL-64 –  $\sim 3.7$  кА/см<sup>2</sup>. Различие, как видим, небольшое. Несколько большая плотность тока, при которой обнаруживаются катодные капли в КС TEL-64, по-видимому, связана с большим временем проникновения АМП в промежуток в данной контактной системе.

#### 4. Заключение

Эксперименты в опубликованных ранее трудах проводились в сильно различающихся условиях, поэтому сравнивать их результаты между собой и с результатами наших исследований трудно. Если говорить о температурах в нуле тока при исследовании стабилизированных АМП дуг в критических режимах, то полученные различными авторами максимальные значения лежат в диапазоне от 1300 до 2450 К!

Более того, большинство работ были сделаны без пространственного разрешения. В этих работах температура поверхности анода определялась в приосевой области. Результаты наших исследований, проведенных с пространственным разрешением, показывают, что приосевая область анода в нуле тока не является наиболее разогретой в момент погасания разряда. Это обстоятельство является следствием движения расплавленного материала в процессе горения дуги.

О роли динамики расплава на формирование температурного профиля анода в нуле тока говорится в [10]. В работе [10] измерения делались с пространственным разрешением, но по утверждению авторов, минимальная температура поверхности анода не сильно отличалась от максимальной. Также с пространственным разрешением была выполнена работа [7]. В [7] при стабилизации дуги АМП 7 мТл/кА и средней плотности тока 4.8 кА/см<sup>2</sup> (что значительно выше, чем в наших исследованиях) максимальная температура анода после нуля тока достигла всего лишь 1550 К, в то время как в наши исследования при меньших плотностях тока получались значения ~1900-2000 К. Отметим, что мы пользовались значениями  $\epsilon_\lambda$ , взятыми из работы [7]. По-видимому, столь сильное расхождение результатов можно объяснить тем, что в [7] наиболее разогретая часть анода не попадала в поле зрения (фотографирование проводилось перпендикулярно оси КС).

Также [7] является единственной работой, в которой была определена температура капель. Температура наиболее разогретых частей капель в [7] составила ~1750 К. О роли капель в пробое упоминали авторы работ [5, 6] (ни механизм формирования капель, ни их температура не исследовались). Авторами [5, 6], однако, отмечалось, что при использовании CuCr электродов капель не наблюдалось. Авторами [35, 36] в своих работах описывают механизмы появления капель в промежутке. Согласно [35, 36], роль капель в процессе пробоя заключается в том, что испарение с них увеличивает концентрацию пара в промежутке. Однако, в случае медь-хромовых электродов, по причине небольшой скорости генерации капель и их малого размера (<30 мкм), капли не играют существенной роли в создании условий для пробоя промежутка [36].

Как видим, полученные нами результаты качественно отличаются от имеющихся в литературе. Основное отличие состоит в том, что, согласно приведённым нами результатам, поверхность анода в нуле тока разогрета сильно неоднородно. Результаты, полученные при испытаниях всех трех КС, суммированы и показаны ниже (Рисунок 4.1.). Видно, что при токах, близких к предельному отключаемому току, температура наиболее разогретых небольших фрагментов поверхности анода (рельефных гребней) приближается к 2000 К. Подавляющая часть поверхности анода, в том числе в приосевой области, имеет температуру ~1500 К, что является результатом движения образовавшегося на аноде расплава, его переноса на периферию и стекания части расплава в прорези и на закругляющуюся (между D2 и D1, Таблица 2) часть поверхность анода.

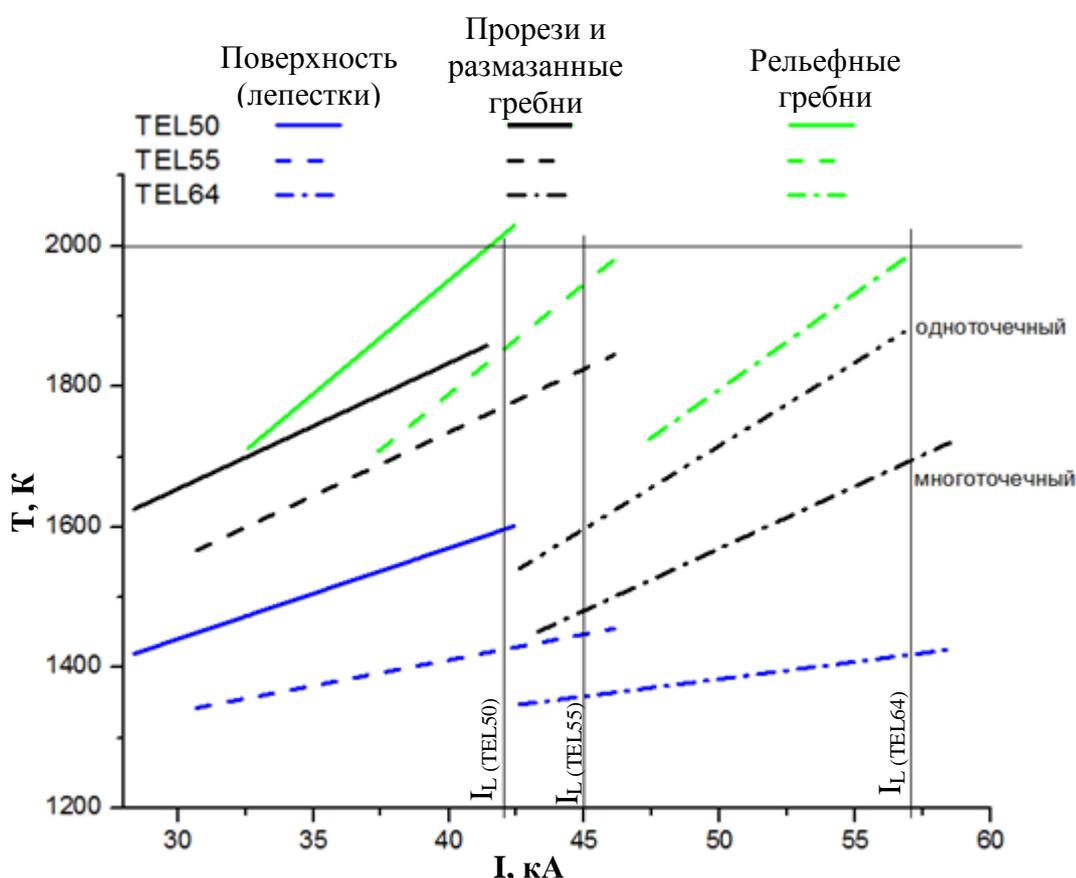


Рисунок 4.1. Максимальные температуры различных частей поверхности анода и температуры лепестков в нуле тока в зависимости от тока дуги для КС TEL-50, TEL-55 и TEL-64.

Согласно [36], если температура медь-хромовых контактов в нуле тока достигает ~2000 К, то при приложении ПВН, характерного для цепей среднего класса напряжений, пробой промежутка длиной  $d = 1$  см произойдет в соответствии с левой ветвью кривой Пашена для пара, источником которого являются перегретые электроды. Однако поверхность электродов разогрета неравномерно. Поэтому когда говорится о температуре

электродов, имеется в виду, что хотя бы на одном из них значительная часть поверхности, имеющая характерный размер, превосходящий межэлектродное расстояние, разогрета до этой температуры.

Опираясь на результаты проведённых испытаний можно утверждать, что после протекания тока, близкого к предельному отключаемому току, в нуле тока на поверхности анодов до температуры  $\sim 2000$  К разогреты 1 или 2 области размером от 1-2 до максимум 5 мм, что существенно меньше длины промежутка. Поэтому испарение с этих фрагментов не может обеспечить выполнение критерия пробоя по параметру  $(n*d)_{crit}$  (см. стр.26, 61, 64, 69). Нужны дополнительные источники пара. Согласно нашим результатам такими источниками являются капли, пролетающие через промежуток вблизи нуля тока.

В настоящих исследованиях было обнаружено, что после погасания разряда, при протекании тока, близкого к предельному отключаемому току:

В промежутке КС TEL-64 наблюдаются крупные медленно летящие капли, оторвавшиеся от анода, температура которых составляет 2050-2150 К. Предполагается, что эти капли локально увеличивают концентрацию пара и тем самым обеспечивают необходимые для пробоя условия.

В промежутках КС TEL-50 и TEL-55 наблюдается большое количество мелких капель, оторвавшихся от поверхности катода. Скорости движения этих капель существенно меньше скорости движения капель, генерируемых КП, горящем на холодном электроде. Предполагается, что эти капли локально увеличивают концентрацию пара и тем самым обеспечивают необходимые для пробоя условия.

Можно предложить такую физическую картину пробойных явлений. При токах, близких к предельному отключаемому току на аноде всех трёх КС появляются большие по размеру (по площади) области поверхности, разогреты до 1700 – 1800 К. Это размазанные гребни и прорезы. Но кроме них, есть ещё и области значительно меньшего размера, которые разогреты до температуры 1900 - 2000 К – рельефные гребни. Давление насыщенного пара, создаваемое размазанными гребнями и прорезами ниже, чем критическое для пробоя на 1-1.5 порядка величины, но они заполняют паром весь промежуток вплоть до катода, т.к. их размер больше длины промежутка. Рельефные гребни существенно увеличивают давление насыщенного пара, но только вблизи анода, т.к. размер их мал. Недостаток пара дополняется испарением с капель. Пар с капель поступает в промежуток везде, в том числе и у катода, т.к. капли летят и заполняют весь промежуток. При неблагоприятном стечении обстоятельств (размер и температура гребней; количество, температура и динамика капель) происходит пробой.

Такое представление о пробое промежутка восстанавливаемым напряжением отличается от предшествующих представлений. Ранее предполагалось, что пробой происходит, когда значительная часть анода прогрета до температур, при которых скорость испарения велика. Предлагаемый в настоящей работе механизм показывает, что условия, в которых произойдёт пробой, могут реализоваться при более низких температурах большей части поверхности анода. Нет необходимости разогревать значительную по площади часть анода до высоких температур. Наполняет паром межэлектродный промежуток не только поверхностный источник – анод, а также объёмный – оторвавшиеся от электродов капли, заполняющие весь промежуток вплоть до катода. Объёмный источник более эффективен и может создать необходимую концентрацию пара в «канале» не слишком большого диаметра, соединяющем катод с анодом. При этом суммарная площадь капель будет всё ещё невелика по сравнению с поперечной площадью сечения КС. Кроме того, возможен каскадный пробой промежутка через последовательность близко летящих капель.

Полученные нами представления о тепловом состоянии электродов и промежутка после погасания дуги могут быть использованы для разработки новых ВДК и для совершенствования конструкции существующих. Как мы увидели, основной причиной пробоя являются заполняющие к нулю тока промежуток капли. Появление капель (как катодных, так и анодных) так или иначе, связано с нагревом электродов. Поэтому и подходы к решению вопроса об увеличении предельного отключаемого тока с учётом предлагаемого в настоящей работе механизма пробоя частично такие же, как и традиционные: нужно стремиться уменьшить плотность потока энергии на электроды (добиться более равномерного распределения тока). Для этого нужно оптимизировать генерируемые электродами АМП.

Очевидно, что уменьшение плотности тока должно привести к уменьшению глубины проплава приосевой части анода и уменьшению высоты жидкого металлического гребня. В первую очередь это актуально для КС ТЕМ-64, т.к. в этой КС при  $I=I_L$  в нуле тока обнаруживаются капли, оторвавшиеся от высоких гребней. Более того АМП, генерируемое КС ТЕМ-64 проникает в промежуток медленнее, чем в КС ТЕМ-50 и ТЕМ-55. Оптимизация АМП может в результате привести к тому, что процесс образования и разрушения гребня будет происходить раньше, и как в КС ТЕМ-50 и ТЕМ-55 к моменту погасания разряда анодных капель в промежутке не будет.

Глубину проплава анода и интенсивность образования анодных капель можно попытаться уменьшить подбором материала, например, уменьшив теплопроводность и

увеличив вязкость и коэффициент поверхностного натяжения анодного расплава (возможно, нужно увеличить количество хрома). Положительный эффект от уменьшения теплопроводности не очевиден. Глубина проплава уменьшится, но температура его возрастёт. Увеличение вязкости и коэффициента поверхностного натяжения, казалось бы, играет только в нужную сторону.

Также отметим, что в наших экспериментах анод был верхним электродом. Поэтому сила тяжести и сила поверхностного натяжения действовали в противоположные стороны. Это помогало образованию выступов на аноде и влияло на их динамику. Если анод будет внизу, сила тяжести и поверхностное натяжение будут работать в одном направлении. Если это даст заметный эффект, то можно думать об «умном» приводе, который ждёт, пока анод будет нижним электродом.

Для КС TEL-50 и TEL-55 границы отключаемых токов приходится на токи, при которых в промежутке обнаруживаются катодные капли. Причину появления видимых нами катодных капель мы связываем с плавлением катода. Из анализа состояния поверхности катодов было видно, что оплавлена не вся рабочая поверхность. Более равномерное распределение плотности тока, а, следовательно, и потока энергии в катод должны привести к уменьшению температуры катода. Добиться уменьшения интенсивности образования катодных капель, вероятно, можно также путем подбора материала накладки.

Вопрос об эффективности тех или иных модификаций с точки зрения увеличения предельных отключаемых токов представляет большой практический интерес.

## Выводы

В настоящей работе было проведено исследование теплового состояния поверхности анода после погасания сильноточной вакуумной дуги в широком диапазоне токов. Исследования были проведены в трех АМП-контактных системах типа TEL, отличающиеся габаритами, АМП-характеристиками и предельными отключаемыми токами. В работе было проведено моделирование процессов проникновения и установления АМП в промежуток во всех трех КС в пакете COMSOL Multiphysics, а также верифицирована численная модель. В работе были получены следующие результаты:

1. Распределение в нуле тока температуры по поверхности анода АМП-контактной системы оказывается сильно неоднородным и определяется историей развития дуги и движением расплава.
2. При токах, близких к предельному отключаемому току, температура наиболее разогретых небольших фрагментов поверхности анода (рельефных гребней) приближается к 2000 К.
3. Кривые остывания разных перегретых участков анода имеют сильно различающуюся форму. Различия кривых остывания обусловлены целым рядом причин, в том числе движением перегретых объектов. Кривые остывания некоторых из перегретых участков имеют характерное плато при температуре, близкой температуре плавления меди. Полученные данные позволяют предположить, что эти объекты были нагреты в дуговой фазе ниже температуры плавления хрома. Кривые остывания тех объектов, которые, как можно предположить, были перегреты выше температуры плавления хрома, плато не имеют.
4. В промежутке КС TEL-64 после протекания тока, близкого к предельному отключаемому току, наблюдаются крупные медленно летящие капли, оторвавшиеся от анода незадолго до погасания дуги, температура которых составляет 2050-2150 К. Отсутствие анодных капель в нуле тока (при протекании предельных отключаемых токов) в промежутках КС TEL-50 и TEL-55 связано с тем, что отрыв капель от анода происходит существенно раньше нуля тока, чем в КС TEL-64. К моменту погасания разряда анодные капли либо возвращаются обратно на анод, либо покидают поле зрения. Факт более позднего отрыва капель от анода в КС TEL-64 коррелирует с большим временем проникновения АМП в промежуток КС.

5. В промежутках КС TEL-50 и TEL-55 после протекания тока, близкого к предельному отключаемому току, наблюдается большое количество мелких капель, оторвавшихся от поверхности катода; скорость движения этих капель существенно меньше скорости движения капель, генерируемых КП, горящих на холодном катоде. В КС TEL-64 катодные капли обнаруживаются при токах, на несколько килоампер больших предельного отключаемого данной КС тока.
6. Предполагается, что наблюдаемые во всех трех КС в нуле тока капли локально увеличивают концентрацию пара и тем самым обеспечивают необходимые для пробоя условия.

### **Благодарности**

Автор благодарит руководителя работы М. А. Павлейно за консультации и обсуждения при выполнении работы.

Автор также выражает глубокую благодарность сотрудникам лаборатории «Физики низкотемпературной плазмы» ФТИ РАН им. Иоффе, где была сделана настоящая работа, в частности С. М. Школьнику и К. К. Забелло за руководство работой и ценные дискуссии. Автор также благодарит сотрудников лаборатории «Физики низкотемпературной плазмы» А. А. Логачева за помощь в работе и участие в обсуждении результатов, и Ю. А. Барина за помощь в наладке оборудования для измерения магнитных полей.

## Литература

1. Вакуумные дуги. Теория и приложения. Под ред. Дж. Лафферти., Москва: Мир, 1982, 432 с;
2. С. М. Школьник «Физические процессы в вакуумной дугогасительной камеры и её отключающая способность», Севастополь, 2008;
3. Burkhard Juttner, “Cathode spots of electric arcs”. Journal of Physics D: Applied Physics. 2001;
4. E. Dullni, E. Schade, B. Gellert, “Dielectric Recovery of Vacuum Arcs after Strong Anode Spot Activity”, IEEE Trans. Plas. Sci., vol. PS-15, no. 5, pp. 538-544, 1987;
5. N. Ide, R. Sakuma, E. Kaneko, S. Yanabu, “The Electrode Surface State after Current Interruption in Vacuum Circuit Breaker”, XXII ISDEIV, Matsue, Japan, pp. 396-399, 2006;
6. M. Sugita, S. Okabe, G. Ueta, W. Wang, X. Wang, S. Yanabu, “Interruption Phenomena for Various Contact Materials in Vacuum”, IEEE Trans. Plas. Sci., vol. 37, no. 8, pp. 1469-1476, 2009;
7. A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, G. Sandolache, H. Schellekens, “Anode Temperature and Plasma Sheath Dynamics of High Current Vacuum Arc After Current Zero”, IEEE Trans. Plas. Sci., vol. 41, no. 8, pp. 2022-2028, 2013;
8. K. Watanabe, E. Kaneko, S. Yanaby, “Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters”, IEEE Trans. Plas. Sci., 1997, v. 25, no.4, pp.609-616;
9. K. Watanabe, J. Sato, K. Kagenaga, H. Somei, “The Anode Surface Temperature of CuCr Contacts at the Limit of Current Interruption”, IEEE Trans. Plas. Sci., 1997, v. 25, no.4, pp.637-641;
10. H. Schellekens, M.B. Schulman, “Contact Temperature and Erosion in High-Current Diffuse Vacuum Arcs on Axial Magnetic Field Contacts”, IEEE Trans. Plas. Sci., 2001, v. 29, no.3, pp.452-461;
11. Г. А. Месяц, Эктоны (часть I), Екатеринбург, УИФ “Наука”, 1993, 184 стр;
12. Bushik A.I., Juttner B., Pursch H., Shilow V.A., Effect of local heat accumulation at the cathode of vacuum arcs. Preprint 83-1, Zentralinstitut für Electronenphysik Akademie der Wissenschaften der DDR, Februar 1983;

13. Г. А. Любимов, В. И. Раховский. Катодное пятно вакуумной дуги. Успехи физических наук. Август 1978г. Том 125, выпуск 4;
14. Robson A.E., The motion of an arc in magnetic field. IV Int. Conf. Phen. Ionised Gases, Uppsala. 1959, vol.IIb. pp.346-349;
15. Chaly, A. M., Barinov, Y. A., Zabello, K. K., & Shkol'nik, S. M. "Comparison of the characteristics of vacuum arc cathode spots on the tungsten and the molybdenum electrodes", XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Tomsk, 2012. pp 349–352;
16. C. W. Kimblin, "Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arc", J. Appl. Phys., 1973, v. 44, No. 7, pp.3074 – 3081;
17. Davis W. D., Miller H. C., "Analysis of the Electrode Products Emitted by dc Arcs in a Vacuum Ambient". Journ. Appl. Phys., 40, 2212 (1969);
18. Daalder, J. E., Agarwal, M. S., Holmes, R., Goldsmith, S.. Components of cathode erosion in vacuum arcs, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9, 1976;
19. A.M. Chaly "Magnetic control of high current vacuum arcs with the aid of an axial magnetic field: a review" IEEE Trans. Plas. Sci., 2005, v.33, N5, pp.1497-1503;
20. S.M. Shkol'nik. "Secondary plasma in the gap of high current vacuum arcs: origin and resulting effects", IEEE Trans. Plasma Science, vol. 31, no. 5, pp. 932-946, 2003;
21. J. Heberlein, J. Gorman, "The high current metal vapor arc column between separating electrodes", IEEE Transactions on plasma science, Vol. PS-8, No. 4, pp. 283-288, December 1980;
22. H. C. Miller. A Review of Anode Phenomena in Vacuum Arcs IEEE Transactions on plasma science, Vol. PS-13, No. 5, pp.242-252, October 1985;
23. C.W. Kimblin and R.E. Voshall, "Interruption ability of vacuum interrupters subjected to axial magnetic fields", Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 119, pp. 154- 158, 1972;
24. A.M. Chaly, A.A. Logatchev, and S.M. Shkol'nik, "Cathode processes in free burning and stabilized by axial magnetic field vacuum arcs". IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 2, no.4, pp. 827 - 835, Aug. 1999;
25. A.M. Chaly, A.A. Logatchev, K.K. Zabello, and S.M. Shkol'nik, "High current vacuum arc appearance in nonhomogeneous axial magnetic field", IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 31, no.5, pp.884-889, Oct. 2003;

26. S.M. Shkol'nik, V.P. Afanas'ev, Yu.A. Barinov, A.M. Chaly, A.A. Logatchev, S.I. Malakhovsky, I.N. Poluyanova, K.K. Zabello, "Distribution of Cathode Current Density and Breaking Capacity of Medium Voltage Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Field", IEEE Trans. Plasma. Sci., vol.33, no.5, pp.1511-1518, Oct. 2005;
27. Выходцев А. В. «Исследование начальной стадии сильноточного вакуумного дугового разряда, инициированного разрывом контактов», магистерская работа, СПбГУ, физ. фак., пмф, 2011г;
28. Ключко С. В. «Развитие вакуумной дуги на протяжении полупериода тока промышленной частоты», магистерская работа, СПбГУ, физ. фак., пмф, 2016г;
29. E. Dullni, B. Gellert, E. Schade, "Electrical and Pyrometric Measurements of the Decay of the Anode Temperature After Interruption of High-Current Vacuum Arcs and Comparison With Computations", IEEE Trans. Plas. Sci., vol. 17, no.5, pp. 644-648, 1989;
30. Y. Niwa, J. Sato, K. Yokokura, T. Kusano, E. Kaneko, I. Ohshima, S. Yanabu, "The Effect of Contact Material on Temperature and Melting of Anode Surface in the Vacuum Interrupter", 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV, 2000;
31. Z. Wang, H. Ma, G. Kong, Z. Liu, Y. Geng, J Wang, "Decay Modes of Anode Surface Temperature After Current Zero in Vacuum Arcs-Part I: Experimental Study", IEEE Trans. Plas. Sci., vol. 42, no. 5, pp. 1464-1473, 2014;
32. T. Pieniak, M. Kurrat and D. Gentsch, "Surface temperature measurement of transversal magnetic field contacts using a thermography camera", 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2016; Suzhou; China; September 2016;
33. R. Methling, St. Franke, S. Gortschakow, M. Abplanalp, R.-P. Sütterlin, T. Delachaux, and K.O. Menzel, "Comparison of Methods of Electrode Temperature Determination in High-Current Vacuum Arcs", 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2016; Suzhou; China; September 2016;
34. C. P. Wolf, "Experimentelle Untersuchung des Hochstrom-Vakuumbogens auf Transversal-Magnetfeld Kontakten," Doctoral, TU-Braunschweig, Braunschweig, 2012;
35. Schade E., Dullni E., Recovery of Breakdown Strength of a Vacuum Interrupter After Extinction of High Currents, IEEE Trans. Diel. Elect. Insul., Vol. 9, No. 2, April 2002, pp. 207-215;

36. Dullni E., Shade E., Recovery behavior of vacuum current-breakers at the current interruption limit, Proc. 14th ISDEIV, Santa Fe, 1990, pp.517-521;
37. В. Эспе, Технология электровакуумных материалов, перев. с нем. Под ред. Р.А. Нилендера и А.А. Котляра, т.1, Госэнергоиздат, М., Л., 1962 г.;
38. S. Jia, D. Yang, L. Wang, Z Shi, "Investigation of the swirl flow on anode surface in high-current vacuum arcs", J. Appl. Phys., vol. 111, 043301, 2012;
39. Dullni E., Shade E., Recovery behavior of vacuum current-breakers at the current interruption limit, Proc. 14th ISDEIV, Santa Fe, 1990, pp.517-521.

#### **Авторские публикации**

- 1а. Chaly, A.M., Poluyanovа, I.N., Yakovlev, V.V., Zabello, K.K., Logatchev, A.A., Shkol'nik, S.M.. "Experimental study of anode surface temperature after current zero for a range of current levels". 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2016; Suzhou; China; September 2016;
- 2а. I.N. Poluyanovа, K.K. Zabello, A.A. Logatchev, V.V. Yakovlev, S.M. Shkol'nik, "Measurements of Thermal Radiation Brightness of Anode Surface After Current Zero for a Range of Current Levels". IEEE Transactions on Plasma Science. Принята к публикации.

## Приложения

### Приложение 1. Тепловое излучение и его характеристики

Любое нагретое тело испускает тепловое излучение, для описания которого удобно сопоставлять его с излучением так называемого «абсолютно чёрного тела». Коэффициент поглощения абсолютно черного тела равен единице. По закону Кирхгофа коэффициент излучения любого тела равен его коэффициенту поглощения. Значит, коэффициент излучения чёрного тела равен единице. Для характеристики излучения нагретого тела обычно используют энергетическую светимость и энергетическую яркость (см., например, [5]).

Под полной энергетической светимостью тела понимают полную (интегральную) поверхностную плотность излучаемой мощности:

$$R(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda, T) d\lambda$$

где  $R(T)$  – полная энергетическая светимость при температуре  $T$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $\lambda$  – длина волны излучения (м),  $R(\lambda, T)$  – спектральная энергетическая светимость, отнесённая к узкой области спектра  $d\lambda$ .

Энергетической яркостью тела в данном направлении называется мощность излучения в единичный телесный угол с единицы площади проекции поверхности тела на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Полная энергетическая яркость определяется выражением:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda$$

где  $B(T)$  – полная энергетическая яркость при температуре  $T$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ),  $\lambda$  – длина волны излучения (м),  $B(\lambda, T)$  – спектральная энергетическая яркость, отнесённая к узкой области спектра  $d\lambda$ .

Энергетическая яркость является основной величиной, непосредственно воспринимаемой человеческим глазом, а также всеми пирометрами, измеряющими температуру по тепловому излучению. Для ламбертовских излучателей (яркость которых не зависит от направления распространения излучения) энергетическая светимость и яркость связаны между собой соотношением:

$$R(T) = \pi B(T); R(\lambda, T) = \pi B(\lambda, T)$$

Все реальные тела по степени поглощения ими лучистой энергии отличаются от

чёрного тела и имеют коэффициент поглощения меньше единицы. Излучательная способность реальных тел также отличается от излучательной способности чёрного тела и может быть охарактеризована коэффициентом излучения. Полный коэффициент излучения  $\varepsilon_T$  является мерой, определяющей ту часть полной энергии, которую составляет излучение данного тела от полного излучения чёрного тела при той же температуре:

$$\varepsilon_T = B(T)/B_0(T)$$

где  $B(T)$  – полная энергетическая яркость тела,  $B_0(T)$  – полная энергетическая яркость абсолютно черного тела. Аналогичным образом определяется спектральный коэффициент излучения  $\varepsilon_\lambda$ :

$$\varepsilon_\lambda = B(\lambda, T)/B_0(\lambda, T)$$

Для всех реальных тел  $B(T) < B_0(T)$  и  $B(\lambda, T) < B_0(\lambda, T)$ , потому  $0 < \varepsilon_T < 1$  и  $0 < \varepsilon_\lambda < 1$ . Коэффициенты  $\varepsilon_T$  и  $\varepsilon_\lambda$  зависят от вещества тела, состояния его поверхности и температуры. Спектральный коэффициент  $\varepsilon_\lambda$  зависит также от  $\lambda$ , а полный коэффициент  $\varepsilon_T$  – от спектрального состава излучения. Значения  $\varepsilon_T$  и  $\varepsilon_\lambda$  определяются экспериментально.

Спектральная энергетическая светимость чёрного тела описывается формулой Планка:

$$R_0(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

где  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  [Вт · м<sup>2</sup>],  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  [м · К],  $\lambda$  – длина волны в метрах,  $T$  – температура в Кельвинах. Переход к энергетической яркости осуществляется делением на  $\pi$ :

$$B_0(\lambda, T) = c'_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

В ограниченном интервале температур и при малых значениях длин волн зависимость спектральной энергетической яркости чёрного тела от длины волны и температуры может быть выражена более простым выражением (уравнение Вина):

$$B_0(\lambda, T) = c'_1 \lambda^{-5} e^{\frac{-c_2}{\lambda T}}$$

Формула Вина даёт несколько заниженные значения  $B_0(\lambda, T)$ , но ошибка при  $\lambda T < 3000$  мкм · К не превосходит 0.8 %. Это в итоге приводит к завышению температуры примерно на 0.5 градуса для температур ~3000 К и ниже. Такими ошибками в нашем случае можно пренебречь и для простоты пользоваться не формулой Планка, а формулой Вина.

## Приложение 2. Расчет АМП. Постановка численной задачи.

Численный расчет магнитных характеристик реализован в пакете COMSOL Multiphysics. Методика численного расчета генерируемых магнитных полей при протекании тока через контакты была взята из [28]. При выполнении настоящей работы были учтены ценные рекомендации автора [28] по созданию численной модели.

Численная задача решалась в трехмерной постановке. Моделирование процессов проникновения магнитного поля в промежутки не учитывало движение подвижного контакта. Моделирование проводилось при фиксированном межэлектродном промежутке. Решались задачи в двух постановках:

1. межэлектродный промежуток замкнут тремя медными цилиндрическими вставками (Рисунок п.0.1., справа), форма тока – прямоугольный импульс тока;
2. межэлектродный промежуток замкнут плазменным цилиндром (Рисунок п.0.1., слева) с проводимостью  $10^4$  См/м и магнитной проницаемостью равной единице, форма тока – синусоидальный импульс тока, первый полупериод;

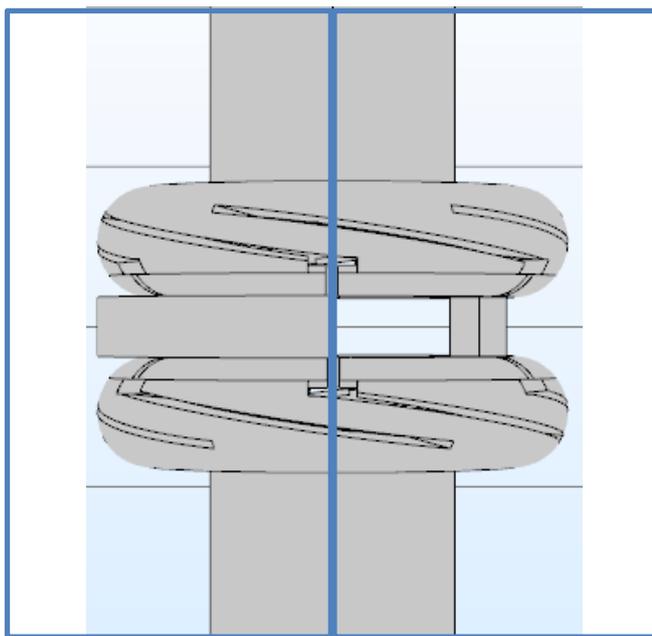


Рисунок п.0.1. Геометрия КС 50. Слева – для синусоидального импульса тока, справа – для прямоугольного.

В обоих случаях контактная система вместе с токоподводами окружается непроводящей электрический ток средой, представляющей собой цилиндр. Торцы непроводящего цилиндрического домена совмещались с границей токоподводов. Радиус цилиндра по рекомендациям автора [28] был выбран минимально возможным ( $R=100$  мм).

Используются два модуля: модуль Electric currents (EC), в котором рассчитывается

стационарное распределение плотности электрического тока, и Magnetic fields (MF), в котором происходит расчет магнитного поля с учетом возникающих вихревых токов, используется переходной анализ.

Рассчитываемая система уравнений выглядит следующим образом:

$$\operatorname{div}(\vec{j}) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla \varphi \quad (2)$$

$$\vec{B}(t) = \nabla \times \vec{A}(t) \quad (3)$$

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}(t)}{\partial t} + \nabla \times \frac{1}{\mu\mu_0} \vec{B}(t) = f(t)\vec{j} \quad (4)$$

Уравнения 1 и 2 рассчитываются в модуле EC, уравнения 3 и 4 – в модуле MF. Плотность электрического тока  $f(t)\vec{j}$  задается как внешняя нагрузка в уравнение (4). В зависимости от типа задачи функция или функция Хэвисайда  $f(t) = \theta(t)$  (в первой постановке), или синус  $f(t) = \sin \omega t$  (во второй постановке).

Граничные условия:

- модуль Electric currents (EC). На торец одного токоподвода задается нулевой потенциал, на торец другого – плотность тока, на поверхности касания проводящих и непроводящих доменов автоматически задается условие электроизоляции.
- модуль Magnetic fields (MF). На границах воздушной области ставится условие параллельности вектора магнитной индукции.