

**МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство  
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**физический факультет**

**Квалификационная работа на соискание  
степени бакалавра  
Кафедра физики плазмы**

**Люляков Алексей Александрович**

**Название работы**

**Исследование дуговых генераторов плазмы с холодным катодом в  
режиме секундных импульсов**

---

**Научный руководитель:**

**Дейчули Пётр Петрович**

**Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник,**

**Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН**

**Ступишин Николай Валерьевич**

**Н.с. институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН**

**Новосибирск – 2007 год**

<b>Введение</b> -----	<b>3</b>
<b>Глава 1 Дугоразрядный источник плазмы</b> -----	<b>6</b>
1.1 Типы генераторов плазмы для атомарных инжекторов-----	6
1.2 Дуговой генератор плазмы с холодным катодом-----	7
1.3 Конструкция дугового генератора плазмы с холодным катодом-----	8
<b>Глава 2 Анализ возможности работы дугового генератора плазмы с холодным катодом в секундных импульсах</b> -----	<b>11</b>
2.1 Оптимизация конструкции катодного узла-----	11
2.2 Влияние процессов на катодном электроде-----	13
2.3 Стойкость электродов дугового канала-----	19
2.4 Геометрия анодного электрода-----	23
<b>Глава 3 Экспериментальные результаты</b> -----	<b>25</b>
3.1 Исследование работы генератора плазмы в режимах с компактным и с распределёнными разрядами-----	25
3.2 Вольт амперная характеристика в трёх режимах-----	28
3.3 Характеристики плазмы-----	30
3.4 Экспериментальное исследование ресурса дугового генератора -----	31
<b>Заключение</b> -----	<b>34</b>
<b>Список литературы</b> -----	<b>35</b>

## Введение

Инжекторы нейтральных атомов широко используются в современных термоядерных установках для нагрева, диагностики и создания плазмы.

Для исследовательских установок ближайших лет потребуются инжекционные системы, способные обеспечивать ввод потоков атомов водорода или дейтерия мощностью 10-20 МВт при энергии частиц 40-120 кэВ и длительности импульсов инжекции от единиц до десятков секунд.

Плазменный эмиттер, в самом общем случае, представляет собой поверхность плазмы с определёнными параметрами плазмы на ней, такими как однородность по сечению эмиттера, плотность плазмы, её состав. Важной частью инжектора является система создания плазменного эмиттера. В качестве системы создания плазменного эмиттера в инжекторах используются генераторы плазмы различных типов. Можно обобщить ряд условий [1], которым должна удовлетворять такая система в инжекционных установках:

- 1) площадь эмиттеров достигает нескольких сот квадратных сантиметров при соблюдении высокой степени однородности эмиссии по поверхности во времени (порядка 5%);
- 2) плотность тока эмиссии ионов  $j_+ = 0,3-0,5 \text{ А/см}^2$  ;
- 3) высокое содержание атомарной компоненты в извлекаемом ионном пучке (желательно около 90%);
- 4) высокая газовая эффективность;
- 5) высокая энергетическая эффективность;
- 6) стационарный или квазистационарный режим работы;
- 7) высокая надёжность и достаточно большой ресурс работы;

Хорошо удовлетворяющим вышеперечисленным требованиям системы создания плазменного эмиттера, за исключением последнего пункта,

является дуговой генератор плазмы с холодным катодом. Для данного типа генераторов плазмы характерны высокая однородность плазмы на выходе; хороший массовый состав – доля атомарных ионов близка к 100%; высокая газовая эффективность; высокая энергоэффективность; простота и надёжность конструкции. Вместе с тем для дуговых генераторов плазмы с холодным катодом характерно высокое энерговыделение в области катодного узла и дугового канала порядка  $10^4$  Вт. Это обстоятельство, а так же трудность отвода тепла порядка  $5 \text{ кВт/см}^2$  делают проблематичным использование генераторов данного типа в режимах с длительностью импульса более одной секунды или в стационарном режиме

В ИЯФ накоплен большой опыт работы с дуговыми генераторами плазмы с холодным катодом, с начала 70х годов ведутся работы по созданию диагностических инжекторов на основе дугового разряда с холодным катодом с высокой плотностью тока [2]. В ИЯФ были разработаны дуговые генераторы плазмы с холодным катодом, которые надёжно работают в диапазоне импульсов порядка сотен миллисекунд, например ДИНА - 5. Ресурс этого генератора составляет  $3\text{-}5 \cdot 10^5$  импульсов длительностью до ста миллисекунд. Однако при попытке работы с данным генератором в многосекундном диапазоне импульсов наблюдалось резкое сокращение ресурса работы, вплоть до выхода из строя генератора плазмы в одном импульсе. Это происходило, главным образом из за высоких термических нагрузок в области катодного узла и дугового канала генератора (мощность выделяемая на катоде  $3 \cdot 10^3\text{-}10^4$  Вт). В ИЯФ был сделан ряд модификаций генератора плазмы ДИНА-5. Модификации были направлены на повышение стойкости к тепловой нагрузке элементов генератора и затронули, главным образом, катодный электрод, катодный узел и разрядный канал. Это позволило существенно улучшить показатели этого типа генератора, в частности выйти в секундный диапазон импульсов при ресурсе работы генератора порядка года. При этом

все достоинства присущие генератору плазмы с холодным катодом были сохранены.

В данной работе приведено детальное рассмотрение модифицированного генератора плазмы с холодным катодом, приведены некоторые оценки времени работы катодного узла в режиме одного импульса и его ресурсу. Так же проведен ряд экспериментов, направленных на изучение возможностей по улучшению основных параметров дугового генератора плазмы с холодным катодом в режиме секундных импульсов.

Основной целью данной работы является поиск и применение методов увеличивающих ресурс работы дугового генератора плазмы с холодным катодом в режиме секундных импульсов при сохранении всех преимуществ данного типа генератора.

# Глава 1 Дугоразрядный источник плазмы

## 1.1 Типы генераторов плазмы для атомарных инжекторов

Существует несколько типов генераторов плазмы, различаемых [3] главным образом по способу получения в них газового разряда низкого давления. Этот принцип не будет сильно нарушен, если источники объединить по типу эмиттера электронов – катода. По этому признаку можно разделить ионные источники на три группы:

1) Источники с накаливаемым катодом. К этой группе можно отнести ионные источники с накаливаемым катодом из  $\text{LaB}_6$ , источники с прямым дуговым разрядом, дуоплазматрон. Эмиссия электронов в таких генераторах осуществляется путём термоэмиссии. Материал катода разогревается до температуры, когда из-за высокой тепловой энергии электроны легко преодолевают потенциальный барьер по выходу из материала катода.

2) Источники с холодным катодом. К ним относятся источники, основанные на дуговом разряде с холодным катодом (при малом падении потенциала) и разрядом с осцилляцией электронов в магнитном поле. Эмиссия электронов в генераторах данного типа происходит преимущественно путём термоэлектронной эмиссии из локальных, небольших, сильно разогретых участков катода, так называемых катодных пятнах [4]. К этой же группе можно отнести источники с холодными электродами, в которых начальный разряд в вакууме приводит к необходимому для основного разряда выделению рабочего газа из электродов (титановые, искровые источники и др.).

3) Источники, в которых процессы на электродах не имеют существенного значения, – источники с высокочастотным разрядом. К этой группе относятся импульсные и стационарные источники с ли-

нейным или кольцевым разрядом и разнообразным использованием магнитного поля.

## **1.2 Дуговой генератор плазмы с холодным катодом**

В данной работе проводилось исследование дугового генератора плазмы с холодным катодом. В отличие от прочих источников плазмы в основе дугового источника плазмы с холодным катодом лежит дуговой разряд [4], [5]. Дуговой разряд, в схеме с холодным катодом, характеризуется слабо спадающей или почти постоянной вольт амперной характеристикой, малым катодным падением потенциала и стягиванием разряда на катоде в так называемое катодное пятно. Катодное пятно характеризуется высокой скоростью перемещения по катодному электроду, малым линейным размером (порядка  $10^{-3}$  сантиметров) и одновременным существованием нескольких пятен на катоде и примерно постоянным полным током катодного пятна. Например, как указано в книге [4], для меди полный ток катодного пятна составляет 10 - 15А и для вольфрама 25 – 30 А.

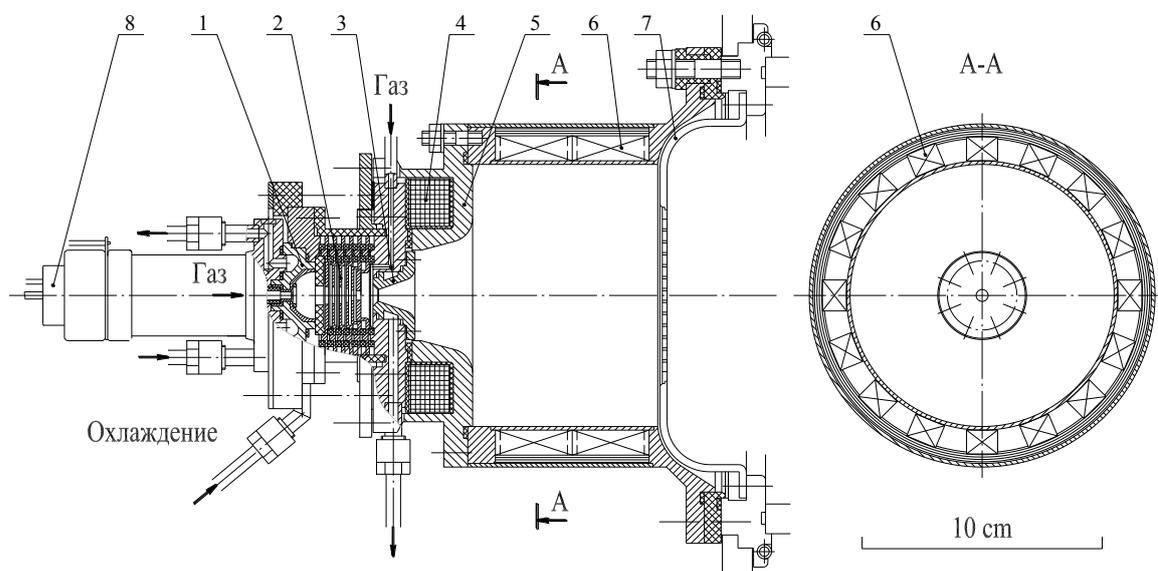
Эмиссия электронов с катодного электрода обусловлена, преимущественно, термоавтоэлектронной эмиссией. Наряду с термоавтоэлектронной эмиссией в дуговом разряде с холодным катодом проявляется взрывной процесс эмиссии электронов. Основная эмиссия электронов в дуговом разряде происходит из катодного пятна. Катодное пятно в дуговом разряде характеризуется [4] высокой температурой ( $T=2500$  К) и высокой плотностью тока  $10^3$ - $10^8$  А/см<sup>2</sup>.

Такие генераторы привлекательны в качестве плазменного эмиттера инжектора, поскольку обладают рядом достоинств: простота конструкции, хороший массовый состав, высокая газовая эффективность, возможность формировать слаборасходящиеся пучки. При этом из-за высокого энерговыделения в области катодного узла и дугового канала такие источники имеют ограниченный ресурс работы.

Характерные времена работы в современных термоядерных установках составляют секунды и десятки секунд. Поэтому востребованы инжекторы со сравнимой длительностью импульса.

### **1.3 Конструкции дуговых генераторов плазмы с холодным катодом**

Принципиальную схему дугового генератора плазмы можно рассмотреть на примере разработанного в Новосибирском Институте ядерной физики источника плазмы [6] для диагностического инжектора быстрых атомов водорода (гелия) показана на рис.1. Дуговой разряд горит в канале, образованном кольцевыми проводящими диафрагмами (2), изолированными друг от друга керамическими шайбами. Анод (3) и диафрагмы дугового канала, за исключением ближайшей к катоду, изготовлены из меди для эффективного теплоотвода. Прикатодная диафрагма изготовлена из молибдена. Катод источника (1) имеет полусферическую полость радиусом 1см и изготовлен из меди. Его поверхность для уменьшения распыления закрыта молибденовой вставкой. Катод охлаждается водой, протекающей в полости у его задней стенки. Охлаждение анода осуществляется потоком воды в опоясывающем кольцевом канале. Диафрагмы охлаждаются водой, циркулирующей в кольцевых полостях между ними. При работе источника плазмы каналы охлаждения анода, катода и диафрагм соединялись последовательно.



*Рис. 1. Квазистационарный источник плазмы: 1-катод, 2-диафрагмы дугового канала, 3-анод, 4-катушка для создания продольного магнитного поля, 5-магнитопровод, 6-камера с постоянными магнитами, 7-электрод ионно-оптической системы инжектора, 8- газовый клапан.*

Для существенного (в 3-10 раз) увеличения выхода плазмы из источника в области анода с помощью специальной катушки (4) создавалось продольное магнитное поле. Максимальная величина этого поля достигалась в области анода. Для эффективного использования магнитного потока и экранирования области расширения плазменной струи от магнитного поля катушка была помещена в стальной магнитный экран (5). В стандартном режиме работы напряженность магнитного поля вблизи анода была 0.1 Т, что соответствует величине тока в катушке около 10 А.

Источник плазмы должен создавать плазменный поток с необходимым током и с хорошей однородностью в области плазменного эмиттера. Дуговой генератор обладает компактным разрядным каналом, фор-

мируемым рядом диафрагм (2). Плазма, находящаяся под давлением в дуговом канале, расширяется в область камеры с постоянными магнитами (6), расположенными на стенке этой камеры. Часть плазмы под действием поля постоянных магнитов отражается от этой стенки, т.о. предотвращается гибель большой доли плазмы на стенке камеры и достигается однородность потока плазмы по его сечению. На выходе из этой камеры с “магнитной” стенкой перед первым электродом (7) ионно-оптической системы создаётся однородный поток плазмы, который затем поступает в ИОС для фокусировки и создания пучка. Апертура плазменного эмиттера, который создаёт в течение импульса в плоскости первой сетки ИОС однородную по сечению поверхность плазмы с заданным током, определяется требуемым током и достижимой плотностью тока.

Диаметр камеры с магнитной стенкой сделан несколько больше диаметра рабочей поверхности первой сетки ИОС, чтобы неоднородность потока, плазмы присутствующая вблизи стенок камеры не перекрывалась с рабочей поверхностью первой сетки ИОС.

Характерные параметры дугового генератора плазмы с холодным катодом можно рассмотреть на примере генератора, работающего в диагностическом инжекторе ДИНА-5 созданном в ИЯФ [7].

Длительность импульса этого генератора плазмы составляет 50 мс, полный поток ионов составляет порядка 28 А, однородность плазменного эмиттера в плоскости первой плазменной сетки  $\pm 10\%$ , содержание протонов в плазме для такого генератора составляет порядка 90%, сетки ИОС имеют 421 отверстие диаметром 4мм, расположенные в гексагональном порядке с шагом 5мм, рабочая поверхность сеток представляет собой круг диаметром 110мм, а суммарная площадь отверстий примерно  $53\text{см}^2$

## Глава 2 Анализ возможности работы дугового генератора плазмы с холодным катодом в секундных импульсах

### 2.1 Оптимизация конструкции катодного узла

На рисунках 2, 3, 4 схематично изображены некоторые этапы модернизации катодного узла и дугового канала. На рисунке 2 изображён катодный узел, разработанный в Институте Ядерной Физики СОРАН [2]. Катод (1) в нём выполнен в форме полу сферы и состоит из меди, первая прикатодная диафрагма (2) изготовлена из керамики 22-ХС. Этот катодный узел был разработан, главным образом, для импульсных систем и надёжно работает на временах рабочего импульса до 100 мс.

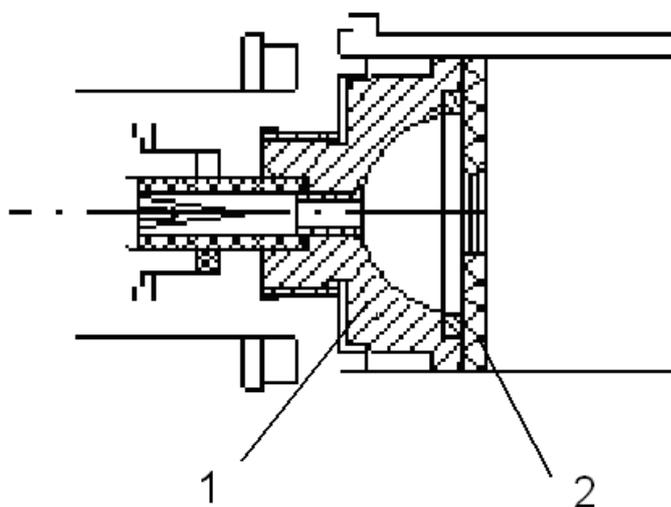


Рис. 2. Катодный узел. 1-медный катод, 2-прикатодная диафрагма.

Далее, на рисунке 3, изображён катодный узел, в котором катод (1) от дугового канала отделяется вместо керамической диафрагмы металлическим изолированным электродом (2).

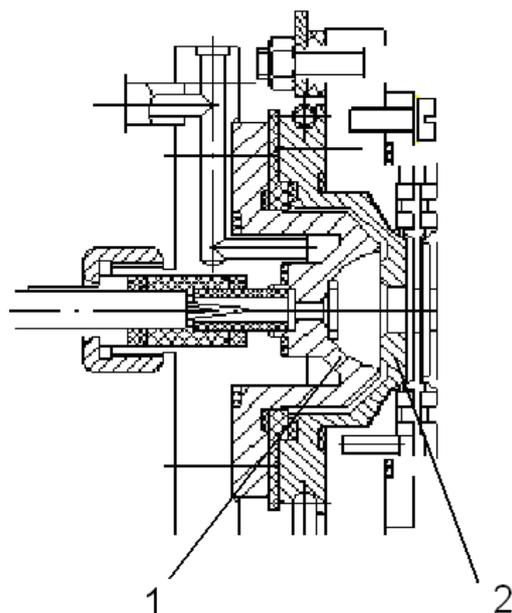


Рис. 3. Катодный узел. 1-медный катод, 2-прикатодный электрод.

На следующем рисунке 4 изображена версия генератора плазмы в которой по сравнению с предыдущей катод был выполнен из более тугоплавкого молибдена в форме цилиндра (1). Для лучшей теплопроводности на границе деталей (1) и (3) молибденовый катодный цилиндр (1) соединялся с медным корпусом катода при помощи золотой пайки.

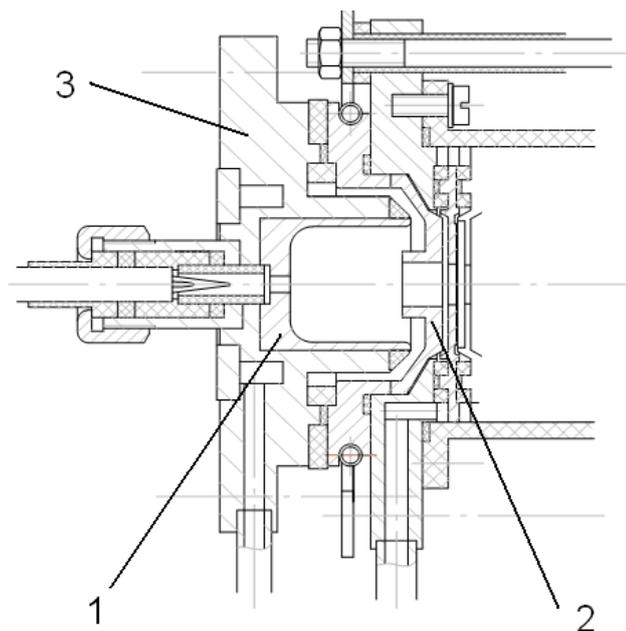


Рис. 4. Катодный узел. 1-молибденовый катод, 2-прикатодный электрод

## 2.2 Влияние процессов на катодном электроде

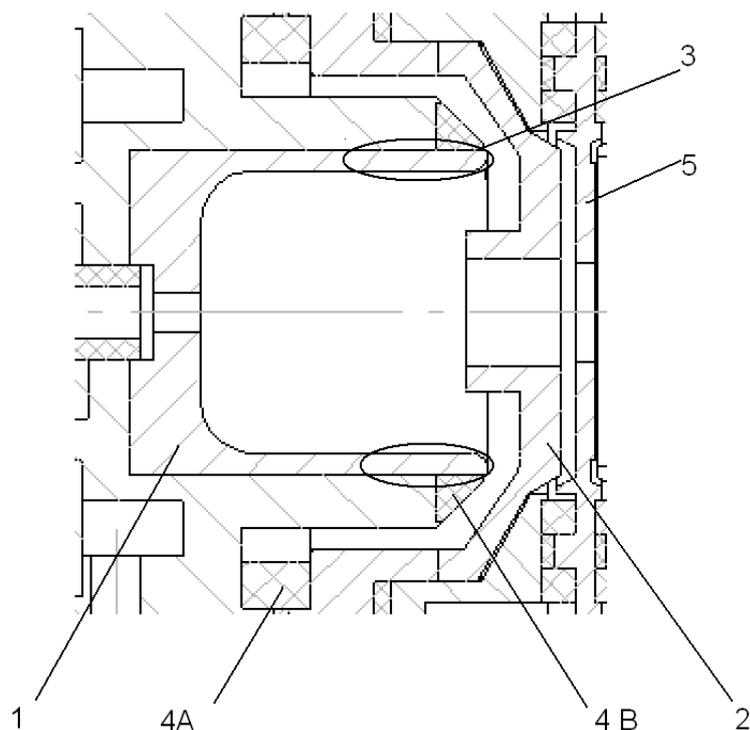
В режиме секундных импульсов изготовленный из меди катод подвержен сильной эрозии, вызванной расплавлением и разбрызгиванием частиц жидкого металла из рабочей зоны катода. Материал катода забивает отверстие для напуска газа, напыляется на близлежащие диафрагмы дугового канала и в экстремальном случае может произойти замыкание дугового канала и возникновение “металлической” дуги. Это всё приводит к неправильной работе или выходу из строя генератора.

На рисунке 5 изображены последовательно – новый катод, средне изношенный катод и сильно изношенный катод, наблюдается зарастание отверстия для напуска газа и эрозия поверхности катода.



*Рис. 5. Износ катода*

В конструкцию, изображенного на фотографиях катода и катодного узла, были внесён ряд изменений, с целью увеличения ресурса и длительности импульса генератора. Схема модифицированного катода изображена на рисунке 6. В конструкции модифицированного генератора плазмы для инжектора ДИНА-ТСV стенки катода (1) были выполнены из более стойкого и тугоплавкого материала молибдена. Так же была увеличена площадь рабочей поверхности катода – катод был изготовлен в виде цилиндра. Эти изменения в конструкции катода существенно снизили распыление поверхности катода при работе генератора в секундном режиме.



*Рис. 6. Катодный узел. 1-катодный электрод, 2-прикатодный металлический электрод, 3-рабочая зона катода, 4А-изолятор, 4В-керамическое кольцо, 5-вторая диафрагма дугового канала.*

Проведем оценку максимальной длительности импульса катодного электрода и так же оценку ресурса катода для дугового генератора плазмы с холодным катодом ДИНА-ТСV, т.е. максимальное количество импульсов при некоторой заданной длительности импульса (для ДИНА-ТСV это две секунды). Экспериментально установлено, что унос материала катода происходит равномерно с поверхности некоторого участка катодного электрода ближайшего к дуговому каналу. Этот участок представляет собой часть стенки цилиндрического катода (рис. 6. (3)), назовём его рабочей поверхностью катода. К преимуществам цилиндрической формы катода можно отнести небольшое напыление материала катода в наиболее “опасную” область прикатодного электрода. Экспериментально установлено, что большая часть материала катода, распыляемая из рабочей зоны, собирается в виде металлических шариков в области катода ближайшей к отверстию для напуска газа. На рисунке 7 изоб-

ражен катод после 2000 двухсекундных импульсов, наблюдается образование металлических шариков в сравнительно “безопасной” зоне катода, ближайшей к отверстию для напуска газа. При этом толщина напыления материала катода на прикатодный электрод (рис.6 (2)) составила порядка 0,5 миллиметра, что не представляет опасности для работы этого дугового генератора.



*Рис. 7. Катод после 2000 двухсекундных импульсов.*

Площадь поверхности рабочей зоны катода составляет  $\sim 7 \text{ см}^2$ . Известно, что мощность, выделяемая в виде теплоты на катоде, составляет примерно треть от всей мощности выделяющейся в генераторе при разряде, которая составляет десятки кВт. Тепло на катодном электроде преимущественно выделяется в локальных участках катода – катодных пятнах, за счёт ионной бомбардировки области катодного пятна. Скорость хаотичного движения катодного пятна в рабочей области катода составляет  $10^3 - 10^5 \text{ см/с}$ , поэтому можно считать, что рабочий участок поверхности катода нагревается равномерно.

Теплота, выделяющаяся в рабочей зоне катодного электрода, частично отводится посредством теплопроводности, а оставшаяся идёт на нагрев и расплавление материала катода. Можно предположить, что изменения связанные с расплавлением и заметным перемещением 5-10 граммов рабочей части катода ведёт к нарушению работы генератора. Оценим максимальное время работы катода при одном импульсе – необ-

ходимое для расплавления скажем 10 граммов материала катода в его рабочей области. Для оценки приближённо заменим цилиндрическую стенку катода на полупространство.

Это допущение правомерно при условии, что времена оценки меньше времени за которое тепло распространится на характерное расстояние равное в нашем случае полной толщине стенки катодного цилиндра. Оценим сначала это время. Из уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T \Rightarrow \frac{T}{t} \propto a^2 \frac{T}{z^2} \Rightarrow t \propto \frac{z^2}{a^2},$$

где  $T$  – температура,  $t$  – характерное время процесса,  $a$  – температуропроводность молибдена,  $z$  – характерная глубина проникновения тепла. Получаем, что время, на котором наши оценки справедливы, составляет порядка полутора секунд.

Решая уравнение теплопроводности для модели плоского теплового потока падающего на полупространство [8], получим

$$T(z, t) = \frac{2qa}{\lambda\sqrt{\pi}} \left[ \sqrt{t} e^{\frac{-z^2}{4a^2t}} - \frac{z\sqrt{\pi}}{2a} \left( 1 - \Phi\left(\frac{z}{2a\sqrt{t}}\right) \right) \right], \text{ где}$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt,$$

$z$  – ось координат, направленная по нормали к плоскости;  $t$  – время за которое падает тепло;  $\lambda$  – теплопроводность молибдена;  $a$  – температуропроводность молибдена;  $q$  – мощность теплового потока на единицу поверхности.

Подставив необходимые физические величины [9], из этого уравнения можно найти время достижения рабочей поверхностью катода ( $z=0$ ) температуры плавления. В нашем случае это время примерно равно

1,9 секундам, обозначим это время  $t_0$ . Для удобства будем различать два временных интервала, а именно интервал  $t_1$  до достижения температура плавления молибдена на поверхности  $0 \leq t_1 \leq t_0$  и интервал  $t_2$  после достижения температуры плавления на поверхности и до окончания импульса. Теплоту необходимую для “разрушения” катода удобно разбить на три составляющие: теплота, отведённая теплопроводностью в глубь материала катода, теплота необходимая для нагрева 10 граммов молибдена до температуры плавления и теплота необходимая для расплавления 10 граммов молибдена. При заданной постоянной мощности потока тепла и известном времени достижения температуры плавления на поверхности катода, можно найти количество теплоты, отведенное в глубь материала из-за теплопроводности. При мощности теплового потока  $P=10^4$ Вт, теплота, отведённая  $Q=2 \cdot 10^4$ Дж за время  $t_0$ . В течение интервала времени  $t_2$  вся теплота, выделяющаяся на катоде, идёт на нагрев и расплавление материала катода. Теплота на нагрев 10 граммов молибдена  $Q=6,7 \cdot 10^3$ Дж. Теплота, затраченная на расплавление 10 грамм молибдена  $Q=2,7 \cdot 10^3$ Дж. Таким образом общая теплота необходимая для существенных повреждений катода  $Q_{\text{общ}}$  примерно равна  $3 \cdot 10^4$ Дж. Отсюда можно получить грубую оценку максимальной длительности импульса дугового генератора и для нашего случая она составляет порядка 3 секунд, при этом глубина проплавления рабочей зоны катода составляет примерно 0,1 см.

Из приведённой оценки видно, что теплота, отводимая в глубь стенок катода из-за теплопроводности, на порядок больше теплоты затраченной на нагрев и на расплавление материала катода. Таким образом, в рамках этой модели можно ввести условно порог времени импульса, который разумно положить примерно равным времени необходимом для достижения температуры плавления молибдена на поверхности катода. Можно предположить что импульсы, времена которых меньше порогового времени несут существенно меньшую нагрузку на катод по сравне-

нию с импульсами времени, которых больше порогового. В нашем случае пороговое время составляет порядка двух секунд.

Поправки к этой оценке связаны с уточнением геометрии катода и требуют численных расчетов. Так же нужно принять во внимание, что только часть расплавленного материала негативно воздействует на работоспособность генератора плазмы. Для уточнения оценки необходимо учитывать принудительное охлаждение катодного узла водой. С учетом этих поправок и с учетом опыта работы с генератором можно оценить длительность единичного импульса, приводящего к разрушению катода примерно в 5-7 секунд. Это примерно согласуется с приведённой выше оценкой.

Проведём теперь оценку ресурса катода. Т.е. оценим количество стандартных для генератора импульсов, за которое унос материала с рабочей поверхности катода достигнет критического. Для рассматриваемого генератора стандартными импульсами будем считать импульсы длительностью 2 секунды, в рамках приведённой выше оценки это время является близким к пороговому. Глубина проплавления рабочей поверхности, при длительности импульса 2 секунды, катода составляет примерно 0,1 мм, которая является характерным размером выбрасываемых из рабочей зоны частиц молибдена.

Если предположить, что за каждый импульс с рабочей поверхности катода уносится одинаковое количество материала, то можно сделать оценку ресурса данного генератора. Для этого был рассмотрен катодный электрод данного генератора, работавший в режиме двух секундных импульсов. Было произведено примерно 2000 рабочих импульсов. При помощи штангенциркуля была измерен объём и посчитана масса унесённого материала катода, она составила примерно 4 грамма. Из предположения о том, что изменение массы рабочей поверхности катода на ~ 6-10 грамм ведёт к нарушению работы генератора можно сделать оценку мак-

симального количества двух секундных импульсов генератора при сохранении рабочих свойств катода. Из сказанного выше видно, что 2000 импульсов генератора соответствует унос материала катода составляющий примерно 4 грамма. Диффузный характер перемещения материала, а так же малый характерный размер частиц переносимых из рабочей поверхности катода приводят к замедлению скорости эрозии с ростом числа импульсов. Опытный результат для данных условий составил  $5 \cdot 10^3$  импульсов, что соответствует примерно году работы на экспериментальной установке.

### 2.3 Стойкость электродов дугового канала

Прикатодная диафрагма используется для формирования дугового канала. При импульсах  $\leq 1$  секунды происходит сильное напыление материала катода на прикатодную диафрагму. При длительности импульса больше 1 секунды осаждения материала катода уже не происходит, но материал керамической диафрагмы начинает сильно эродировать вплоть до полного разрушения диафрагмы.



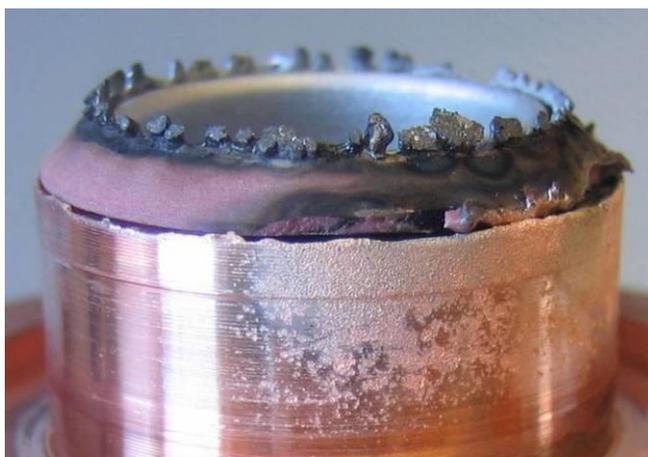
*Рисунок 8. Изображены керамические прикатодные диафрагмы изготовленные из керамики 22-ХС. Слева диафрагма после 500 с. интегрального времени работы в импульсах длительностью 0.5-1с., справа не использованная диафрагма.*

Для борьбы с эрозией прикатодной керамической диафрагмы в конструкцию дугового канала было внесено изменение – была разрабо-

тана конструкция, где для разделения катода и дугового канала вместо керамической диафрагмы был использован массивный металлический изолированный электрод под плавающим потенциалом [12]. Стойкость такого электрода значительно выше, чем у керамической диафрагмы, но при этом возникает проблема его изоляции от катода во время импульса и в течение всего срока службы.

Изоляция металлического прикатодного электрода в рассматриваемой конструкции выполнена следующим образом. Первый керамический изолятор, изображенный на рисунке 6 (4А), изолирует катод и металлический прикатодный электрод. Второй изолятор, имеющий форму кольца (4В), препятствует “забеганию” дуги в щель и запылению первого керамического изолятора и, как следствие, к закорачиванию катода на плавающий электрод.

Установленный нами второй изолятор (4В) из керамики 22ХС подвергался разрушению в разряде – наблюдалось вращивание материала катода в керамику и в итоге это приводило к закорачиванию катода и прикатодной металлической диафрагмы и сильной эрозии этой диафрагмы. На рисунке 9 изображен разрушенный изолятор из керамики 22ХС.



*Рис. 9. Катод с повреждённым изоляционным кольцом из керамики 22ХС*

Хорошие результаты дала замена второго изолятора (4В), изготовленного из керамики 22ХС на изолятор из нитрида бора.



Рис. 10. Катод с изоляционным кольцом из нитрида бора, после примерно 2000 двухсекундных импульсов.

Изоляционное кольцо, изготовленное из нитрида бора, изображённое на рисунке 10, оказалось существенно более стойким к тепловым нагрузкам в этой области катодного узла.

Вторая диафрагма канала, изображённая на рисунке 6 (5), подвержена сильному термическому воздействию в центре и охлаждению на внешней её части, поэтому возникает сильная разница температур и из-за расширения материала диафрагма подвержена растрескиванию, повреждённая диафрагма изображена на рисунке 11. Это может привести к нарушению герметичности системы охлаждения дугового канала и попаданию воды в дуговой канал и, как следствию, нарушению работы генератора.



*Рис. 11. Вторая диафрагма дугового канала, подверженная растрескиванию*

Ранее была изготовлена и установлена на генератор диафрагма с радиальными разрезами, изображенная на рисунке 12. Таким образом, эта диафрагма может свободно расширяться в азимутальном направлении, и не подвержена описанному выше растрескиванию.



*Рис.12. Вторая диафрагма дугового канала с радиальными разрезами*

## 2.4 Геометрия анодного электрода

В дуговом генераторе анод (1), представленный на рисунке 13, имеет форму сопла и выполнен из меди.

В работе [2] экспериментально был определён ряд рекомендаций, по конструкции анода и ближайших прианодных диафрагм, позволяющих оптимизировать выход плазмы при заданном токе разряда и минимальном расходе газа:

1) Диаметры  $d_a$  отверстия в аноде и прианодной диафрагме следует выбирать равными и такими, что бы плотность разрядного тока

$$j_p = \frac{4I_p}{\pi d_g^2} \text{ составляла } 1\text{-}2 \text{ кА/см}^2$$

2) Расстояние между анодом и прианодной диафрагмой следует выбирать равным диаметру отверстия диафрагмы

3) В прианодной части разрядного канала на длине равной диаметру отверстия в прианодной диафрагме следует сохранять диаметр диафрагм постоянным и равным диаметру прианодной диафрагмы

Анод испытывает термические нагрузки, в связи с этим есть необходимость отвода тепла от анода. Охлаждение анода производится водой, протекающей через специальные каналы, изображённые на рисунке 13 (3).

Мощность дугового разряда можно снизить за счёт увеличения выхода плазмы при той же мощности разряда. Для этого в данной работе проводились эксперименты с “распределённым” дуговым разрядом, который позволил увеличить выход плазмы. Схема анода в этом случае представляла собой замыкание собственно анода на корпус камеры с постоянными магнитами накоротко или через сопротивление порядка до-

лей Ом. Таким образом, часть тока разряда ответвлялась от медного анода (1) и шла через корпус камеры с постоянными магнитами (2).

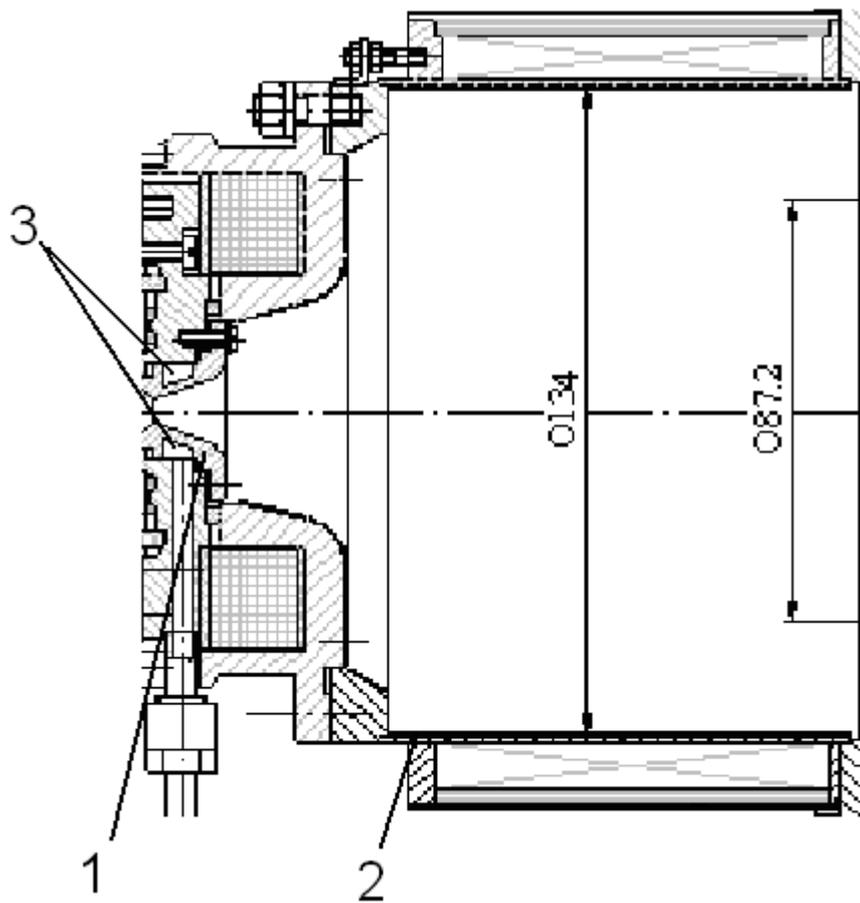


Рис. 13. Анод и камера с постоянными магнитами. 1-медный анод, 2-корпус камеры с постоянными магнитами, 3-водяные каналы.

## Глава 3 Результаты эксперимента

### 3.1 Исследование работы генератора в режимах с компактным и распределённым разрядом

Была исследована работа генератора плазмы при двух режимах разряда - компактным и распределённым разрядом. Режим с компактным разрядом - это режим когда дуга горит между катодом и медным анодом, изображённым на рисунке 13 (1). Режим с распределённым разрядом - это режим когда ток дуги частично ответвляется на корпус (2) камеры с постоянными магнитами. В режиме с распределённым разрядом напряжение от питания генератора прилагалось между катодом и анодом, изображённым на рисунке 13 (1). Корпус камеры с магнитной стенкой был соединён с анодом через сопротивление 0,2 ома. Токи дуги, ток в катушке и ток, ответвляемый на корпус камеры с магнитной стенкой, измерялись соответствующими леммами, сигналы с датчиков LEM выводились на осциллограф. Одному вольту сигнала с датчика LEM, измеряющего ток дуги, соответствует 200 ампер измеряемого тока. Напряжение, измеряемое между катодом и анодом, а так же между катодом и прикатодным электродом делилось в сто раз и затем через гальваническую развязку выводилось на осциллограф.

Ниже приведены осциллограммы. На рисунке 14 изображена осциллограмма: 1-й луч – напряжение между катодом и металлическим прикатодным электродом, 2-й луч - напряжение между катодом и медным анодом, 3-й луч - ток разрядной дуги, 4-й луч - линейно нарастающий ток в катушке, который пропорционален магнитному полю в канале разряда. Осциллограмма получена при режиме работы генератора плазмы с медным анодом – компактным разрядом. На осциллограмме видно,

что магнитное поле в разрядном канале не влияет на вольт амперную характеристику дуги.

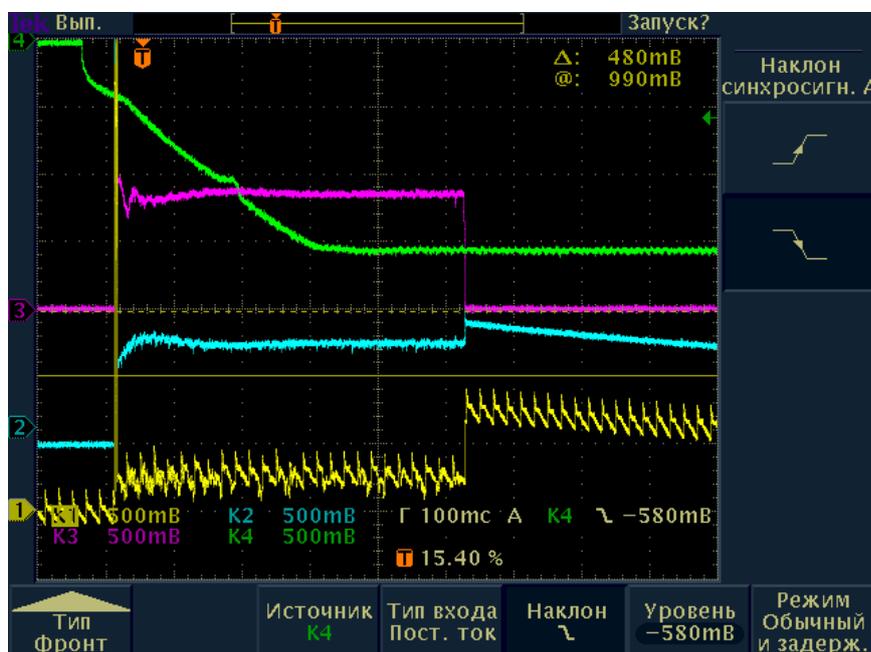


Рис. 14.

На следующей осциллограмме, рисунок 15, изображены параметры генератора при работе в режиме с распределённым разрядом. Четвёртый луч изображает ток ответвления на камеру с постоянными магнитами, сигналы, изображаемые лучами 1, 2, 3 те же, что и на рисунке 14. Магнитное поле линейно нарастает, как показано на рисунке 14. На этой осциллограмме наблюдается зависимость тока ответвления от величины магнитного поля в разрядном канале. При линейном увеличении магнитного поля ток ответвления растёт, пока не наступает некоторое насыщение.

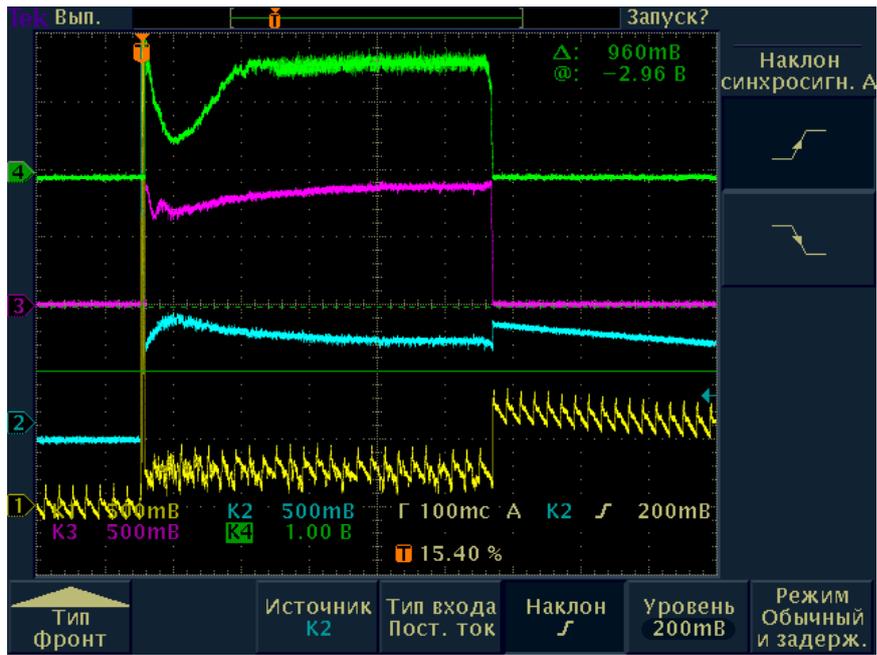


Рис. 15.

На следующей осциллограмме, рисунок 16, изображены параметры генератора в режиме работы с компактным разрядом. Четвёртый луч изображает ток в катушке, сигналы, изображаемые лучами 1, 2, 3 те же, что и на рис 14.

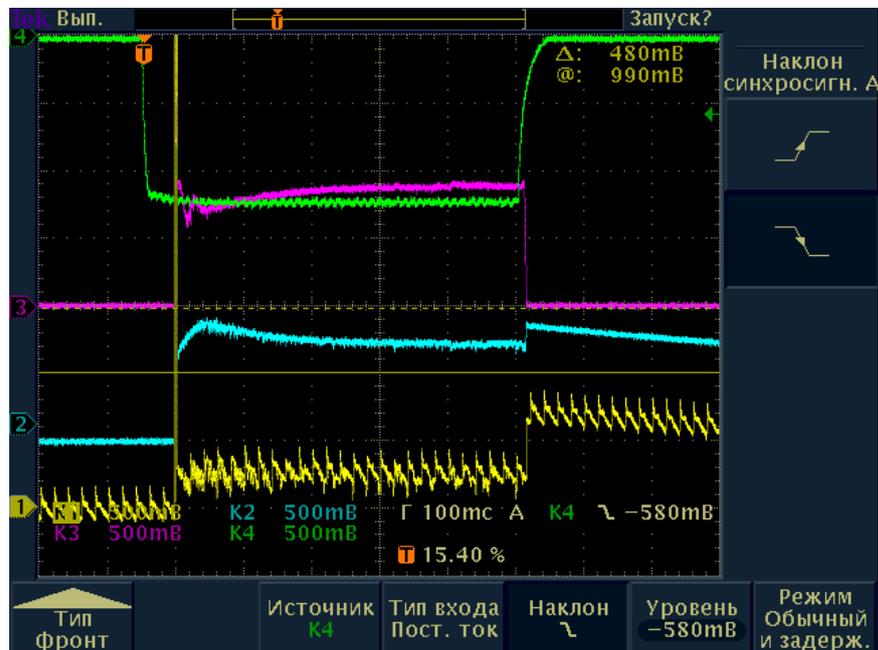


Рис. 16.

Ранее было показано, что в режиме работы генератора с компактным разрядом магнитное поле, создаваемое в разрядном канале генератора катушкой с током, увеличивает выход плазмы от 3 до 10 раз. Основной процесс, происходящий в газоразрядном канале – ионизация молекул водорода электронным ударом. Силовые линии магнитного поля направлены вдоль дугового канала, т.о. электроны,двигающиеся от катода к аноду вдоль дугового канала, замагничиваются и начинают двигаться по силовым магнитным линиям. Это обстоятельство существенно увеличивает эффективность ионизации электронами.

В режиме работы генератора плазмы с распределённым разрядом, магнитное поле сильно влияет на ток, ответвляемый на корпус камеры с постоянными магнитами рисунок 15. На рисунке 15 видно, что при линейном нарастании магнитного поля ток ответвления увеличивается, пока не достигнет некоторого насыщения, и дальше увеличение магнитного поля на него не влияет. По-видимому, такое влияние магнитного поля на ток ответвления объясняется лучшим проявлением замагниченности электронов и изоляции от первого медного анода (рис.13. (1)).

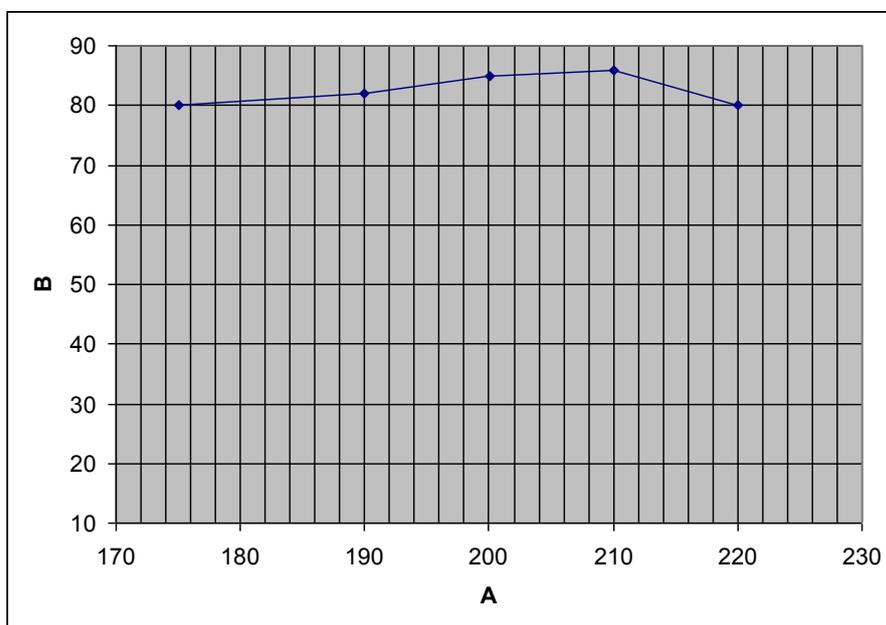
В режиме с распределённым разрядом удаётся повысить выход плазмы при том же токе дуги в полтора - два раза. При токе дуги  $I_d=230A$ , ток пучка  $I_{bim} \approx 1,3A$ , в режиме с медным анодом, изображённым на рисунке 12 (1). При том же токе дуги  $I_d=230A$ , ток пучка  $I_{bim} \approx 2A$ , в режиме с распределённым разрядом. Ток ответвления составляет примерно от 25% до 50%.

Повышение эффективности генерации плазмы в распределённом разряде позволяет снизить мощность, выделяемую в дуговом канале, при заданном выходе плазмы.

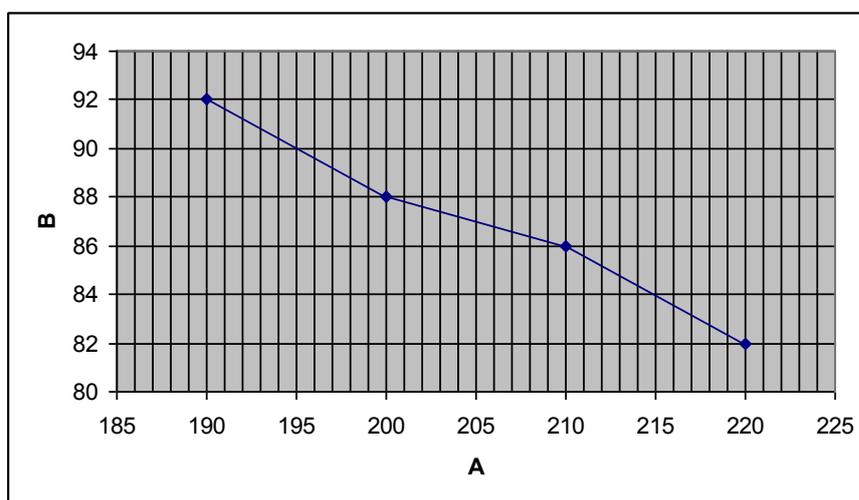
### **3.2 Вольт амперная характеристика**

На рисунках 17, 18 представлены вольт амперные характеристики дугового генератора плазмы с холодным катодом в двух режимах рабо-

ты: режиме с компактным разрядом и в режиме с распределённым разрядом, где сопротивление между анодом и камерой с постоянными магнитами составляет 0,2 Ом.



*Рис.17. Вольт амперная характеристика дугового генератора плазмы с холодным катодом, в режиме с компактным разрядом.*



*Рис. 18 .Вольт амперная характеристика дугового генератора плазмы с холодным катодом, в режиме с распределённым разрядом. Медный анод закорочен на корпус камеры с постоянными магнитами через 0,2 Ом.*

На рисунках 17 и 18 изображены вольт-амперные характеристики дугового генератора плазмы. Данные вольт-амперные характеристики

являются слабо спадающими или постоянными, что характерно для дугового разряда.

Погрешности в этих измерениях связаны с погрешностями измерительных приборов. Погрешность измерительных приборов составляет примерно 5%.

### **3.3 Характеристики плазмы дугового генератора**

Одним из основных параметров генераторов плазмы является состав получаемой плазмы. Состав – это содержание в пучке инжектора атомов с энергией  $E$ ,  $E/2$  и  $E/3$ . Генератор плазмы создаёт поток плазмы, в состав которого входят ионы  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ , которые затем ускоряются в ИОС до одинаковых энергий  $E=e \cdot U$ . Затем, в процессе нейтрализации и диссоциации молекул образуются атомы с различной энергией. Для диагностических целей наличие групп частиц с разными энергиями нежелательно, так как это усложняет обработку экспериментальных данных. Таким образом, массовый состав потока плазмы генератора будет тем “лучше” чем выше будет содержание атомарного водорода в пучке и чем ниже содержание молекулярного водорода.

При определении состава пучка, в силу его нейтральности и высокой мощности, лучше использовать бесконтактный метод диагностики, основанный на регистрации излучения с длинной волны, смещённой вследствие эффекта Доплера, описанный подробно [11]. При наблюдении излучения, рожденного взаимодействием пучка с остаточным газом вакуумной камеры, под углом, группы атомов с разными скоростями образуют разделенные по длине волны спектральные линии.

На выходе инжектора в состав сформированного пучка входят фракции из нейтральных частиц  $E$ ,  $E/2$  и  $E/3$ . Для определения параметров пучка используют газовую мишень. При взаимодействии с мишенью ( $H_2$ ) частицы пучка излучают линию  $H_\alpha$ . Так как излучение регистриру-

ется под углом к оси направления пучка, то согласно эффекту Доплера спектральная линия смещается на величину  $\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{v}{c} \cos(\alpha)$ , где  $\lambda_0$  - несмещённая длина волны,  $\alpha$  - угол между направлением распространения пучка и осью наблюдения,  $v$  – скорость распространения пучка.

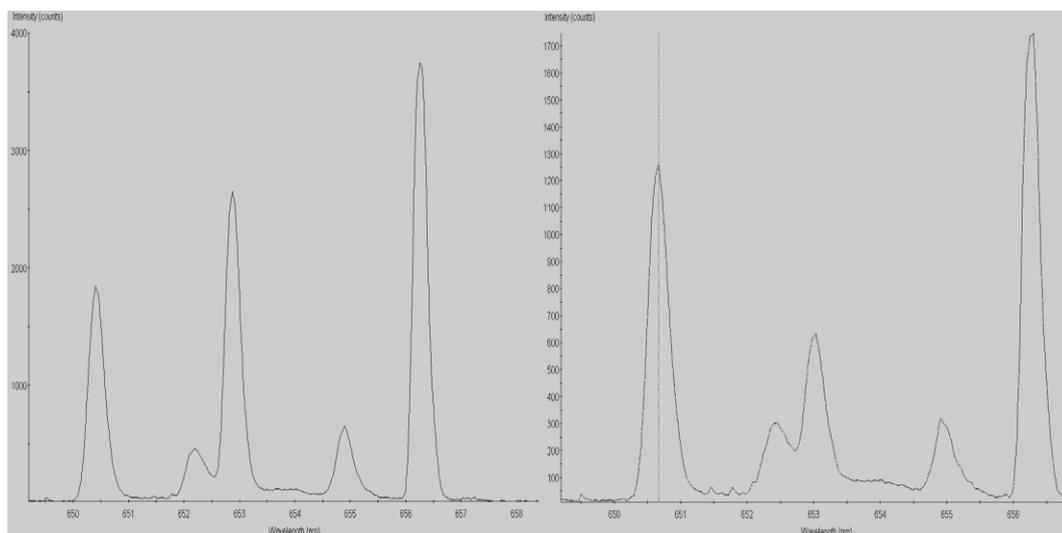


Рис. 19. Спектральный состав пучка атомов водорода. Слева для генератора плазмы в режиме с распределённым разрядом, справа для генератора плазмы с компактным разрядом.

На рисунке 19 изображены спектрограммы. На рисунке 19 слева изображена спектрограмма для режима работы генератора с распределённым разрядом, а справа с компактным разрядом.

Каждой фракции частиц соответствует своя доплеровски смещенная спектральная линия. Спектральная линия, соответствующая энергии  $E$ , сильнее удалена от несмещенной линии, излучаемой фоновым газом, а линии соответствующие энергиям  $E/2$  и  $E/3$  находятся между ними. На спектрограммах, изображенных на рисунке 18, видно, что для режима работы генератора с распределённым разрядом содержание основной компоненты пучка несколько ниже и составляет 75-80%, чем для режима с компактным разрядом ~85%.

### 3.4 Экспериментальное исследование ресурса дугового генератора

Здесь, на рисунках, приведены фотографии основных узлов генератора плазмы с холодным катодом при различных степенях износа.



*Рис. 20. Катод средний износ*

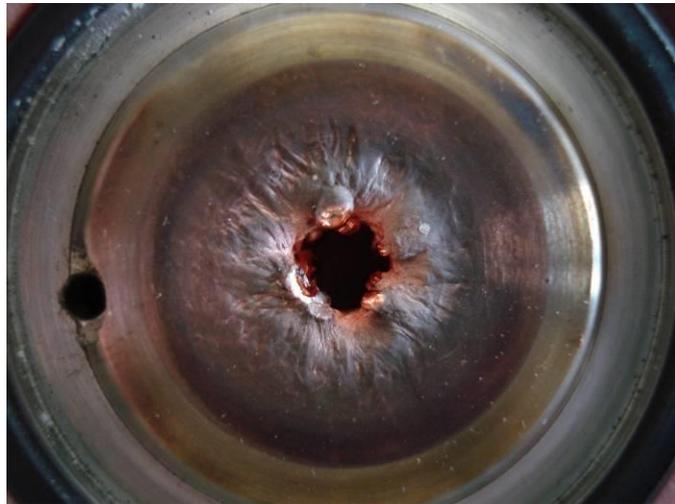
Катод после 500 полусекундных импульсов. Нет видимых изменений катодного электрода. Анализ поверхности электрода указывает на небольшое перемещение материала катода из рабочей области в область, ближайшую к отверстию для напуска газа.



*Рис. 21. Катод сильный износ*

Катод после примерно 2000 двухсекундных импульсов. Наблюдается унос или вытеснение расплавленного материала катода из рабочей области и скопление его в виде металлических шариков молибдена в области катода ближайшей к отверстию для напуска газа. Такое вытесне-

ние материала вглубь катодной полости практически не сказывалось на работоспособности генератора.



*Рис. 22. Анод, подвергнувшийся сильному износу в аварийном режиме*

Анод после примерно 2000 двухсекундных импульсов не претерпевает заметных изменений, на снимке выше заметное повреждение и изменение формы анодного отверстия, произошло после нескольких 4-секундных импульсов с нарушением подачи газа в анодную область разряда. Произошло заметное (на 20-30%) снижение выхода плазмы.

## Заключение

- 1) Была детально исследована одна из модификаций дугового генератора плазмы с холодным катодом, работающего в секундном диапазоне импульсов.
- 2) Исследованы конструкционные решения по увеличению длительности импульсов и ресурса данного генератора плазмы с холодным катодом.
- 3) Проведены некоторые оценки по ресурсным возможностям данного генератора плазмы.
- 4) Экспериментально исследованы возможности увеличения ресурса генератора плазмы в зависимости от режима работы генератора.

В заключении хотелось бы указать на некоторые возможности по увеличению ресурса и длительности импульса данного генератора плазмы. Со стороны катода, процессы на котором были рассмотрены в главе 2, возможно увеличение толщины стенок внешнего слоя катода из материала с высокой теплопроводностью, т.к. теплопроводность материала катодного узла играет решающую роль в отведении теплоты с катода. Со стороны анода интересными представляются эксперименты с распределённым разрядом, так как они, при сравнительно небольшом ухудшении состава плазмы, позволяют снизить разрядный ток и уменьшить тепловую нагрузку в целом. Необходимы исследования направленные на оптимизацию анодного узла при распределённом разряде.

## Список литературы

- 1) Семашко Н. Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В. В., Кулыгин В.М., Панасенков А.А. “Инжекторы быстрых атомов водорода”, Москва Энергоиздат, 1981 166
- 2) Росляков Г.В. “Ионные и атомарные пучки для нагрева и диагностики плазмы”, диссертация Новосибирск 1987
- 3) Габович М.Д. “Плазменные источники ионов”, Киев 1961 – 220
- 4) Раховский В.И. “Физические основы коммутации электрического тока в вакууме,” Москва 1970 – 536
- 5) Браун С. “Элементарные процессы в плазме газового разряда”, Москва 1961 - 322
- 6) Ступишин Н. В., Дейчули П. П., Иванов А. А., Мишагин В. В., “Квазистационарный дуговой генератор плазмы для диагностического инжектора быстрых атомов”, препринт, Новосибирск 2004
- 7) Дейчули П. П., Корепанов С. А., Иванов А. А., Давыденко В. И., Мишагин В. В., Улеманн Р., Ступишин Н. В., Шульженко Г. И., “Инжектор атомов водорода для активной штарковской спектроскопии плазмы”, препринт, Новосибирск 2003.
- 8) Будаков Б. М., Самарский А. А., Тихонов А. Н., “Сборник задач по математической физике”, физматлит, Москва 2004  
Бабичев Н. А.,
- 9) Бабушкина Н. А., Братковский А. М., “Физические величины”, справочник, Москва, Энергоатомиздат 1991
- 10) Ivanov A. A., Deichuli P. P., Kreter A., Maximov V. V., Podminogin A. A., Shweer B., Shikhovtsev I. V., Stupishin N. V., Uhlemann R., Usoltsev D. V., “Characterization of ion species mix of the textor diagnostic hydrogen beam injector with an rf and arc-discharge plasma box”, препринт, Novosibirsk 2002
- 11) I. Williams, J. Geddes, H. Gilbody “Balmer  $\alpha$  emission in collisions of H, H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup> and H<sub>3</sub><sup>+</sup>”, January 1982, Department of Pre and Applied physics, The Queen’s University of Belfast, Belfast, Northern Ireland

12) R. Uhlemann, R. S. Hemsworth, G. Wang, H. Euringer “Hydrogen and deuterium ion species mix and injected neutral beam power fractions of the TEXTOR-PINIs for 20-60 kV determined by Doppler shift spectroscopy”, January 1992, Institut für Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich GmbH, Association EUROATOM-KFA

12) P. P. Deichuli, G. F. Abdrashitov, A. A. Ivanov, V. V. Kolmogorov, V. V. Mishagin, G. I. Shul’zhenko and N. V. Stupishin, “Ion source with LaB<sub>6</sub> hollow cathode for a diagnostic neutral beam injector”, Review of scientific instruments, Volume 77, Issue 3, Part 2, March 2006.