

УДК 538.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДНЫХ ПЯТЕН  
НА ВЫСТУПАЮЩИХ В ПОТОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДАХ

*В. И. Залкинд, В. В. Кириллов, А. П. Маркина,  
А. С. Тихоцкий, Г. Л. Успенская*

(*Москва*)

Проведено исследование поведения катодных пятен на металлических электродах. Получены зависимости основных характеристик пятен (тока на одно пятно, времени жизни, скорости перемещения, средней площади и т. д.) от характера обтекания поверхности электрода потоком плазмы, температуры поверхности электродов, общего тока на электрод и магнитного поля. Исследования проведены в связи с изучением работы электродов магнитогидродинамических генераторов открытого цикла. Опыты проводились на медных электродах, выдвинутых в поток плазмы продуктов сгорания природного газа с добавкой калия.

Изучение работы охлаждаемых металлических электрода МГД генератора показало, что при токах порядка нескольких десятых ампер на  $1 \text{ см}^2$  происходит пробой холодного пограничного слоя, формируемого у поверхности электрода, и образование контрагированного разряда. Образующиеся в пограничном слое дуги опираются на поверхности электрода на катодные пятна.

Поведение пятен и их характеристики определяют важнейшие параметры работы электрода: электрические характеристики [1] и эрозию материала катода<sup>1</sup>. Для оценки локальной эрозии электрода и приэлектродного падения напряжения необходимо знать основные параметры катодных пятен [2], в частности площадь, занимаемую одним пятном, величину тока, протекающего через пятно, время жизни и скорость перемещения.

Отдельные количественные исследования катодных пятен на плоских металлических электродах были проведены в [3,4]. В связи с недостаточным пространственным и временными разрешением применяемой аппаратуры исследовались сравнительно большие и стационарные пятна. В указанных работах исследования проводились или при отдельных значениях тока на электрод, или в диапазоне сравнительно малых токов.

Цель данной работы — определение основных параметров катодных пятен на электродах в канале МГД генератора при различных температурах их поверхности и различных величинах тока, а также исследование влияния магнитного поля на поведение пятен. Она является продолжением [5]. Исследования были расширены по диапазону токов в несколько раз и на порядок по пространственному и временному разрешению применяемой аппаратуры.

В качестве объекта исследований были выбраны выступающие в поток полусферические электроды из бескислородной меди, которые, как показали проведенные ранее исследования [5], имели минимальную эрозию и наилучшие электрические характеристики.

<sup>1</sup> Кандель В. В. Экспериментальное исследование прикатодных областей электрического дугового разряда с высоким временным разрешением. Канд. дисс., М., 1973.

2 ПМТФ, № 2

Эксперименты проводились в канале МГД генератора крупной экспериментальной установки У-02 [6]. Длина канала 600 м.м., высота по направлению магнитного поля 90 м.м., ширина 180 м.м. Поток плазмы состоял из продуктов сгорания метана в обогащенном кислородом и предварительно подогретом воздухе с добавкой солей калия в качестве ионизированной присадки. Скорость ядра потока плазмы 300  $\div$  500 м/сек при давлении в канале 0.7  $\div$  0.9 ата. Температура плазмы в ядре потока при обогащении воздуха кислородом до 45% и подогреве воздуха до 1300° К, как правило, 2550  $\div$  2700° К. Количество присадки, подаваемой в виде 50%-ного водного раствора поташа, варьировалось от 0.4 до 0.7 по мольному содержанию калия.

В процессе исследований измерялись расходы газа, воздуха, кислорода и присадки, температура подогрева воздуха, статическое давление в рабочей части канала; температура плазмы на входе в канал определялась методом обращения D-линии натрия. Измерение температуры электродов проводилось с помощью хромельальюминиевых термопар, зачеканенных в электроды на глубину 2  $\div$  3 м.м от поверхности. Тепловые потоки к электродам измерялись по расходу и нагреву охлаждающей воды.

Электрод изготавливается из бескислородной меди, имел форму полусферы диаметром 40 м.м и выступал в поток на 40 м.м.

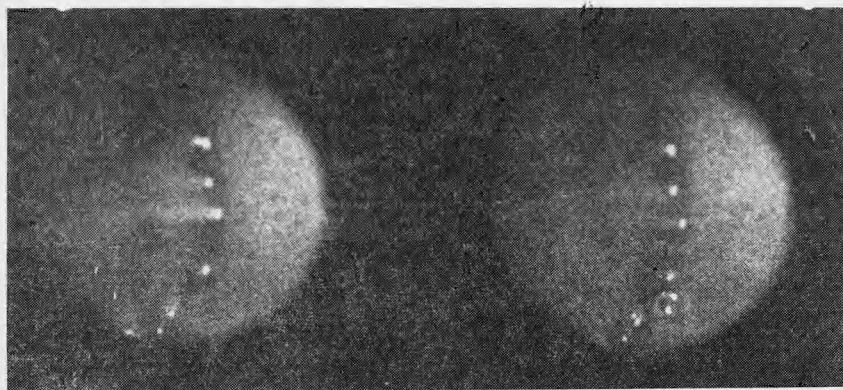
В опытах использовались два типа электродов с различными расстояниями от поверхности, омываемой потоком, до водяного охлаждения — 12 м.м (электрод M12) и 50 м.м (электрод M50). Определенные по тепловым потокам средние температуры поверхности в отсутствие тока на электроды для M12 и M50 соответственно 400  $\div$  450 и 600  $\div$  650° К. При прохождении тока через электроды из-за дополнительных тепловых потоков от катодных пятен внутрь электродов, равных 15  $\div$  30 вт/а, средняя температура поверхности электродов возрастала и составляла при токе 100 а для электрода M12 480  $\div$  530°К и для M50 850  $\div$  950°К.

Для изучения поведения катодных пятен применялась скоростная фотосъемка, которая проводилась с помощью скоростного фоторегистратора СФР-Л, работавшего в режиме «лупы» времени. Скорость съемки менялась от 40000 до 120000 кадр./сек. В связи с тем что для установления температуры поверхности электродов съемка производилась в процессе их длительной работы, а СФР-Л предназначен для съемок импульсных процессов, чтобы избежать наложение кадров на фоторегистограмме, стандартный затвор СФР-Л был заменен на центральный затвор с малым временем срабатывания. Затвор срабатывал от электронной схемы в момент, когда врачающееся зеркало СФР-Л оказывалось напротив первого кадра фоторегистограммы. Для обеспечения необходимого пространственного разрешения применялась дополнительная оптическая система, которая позволяла производить съемку с различным относительным увеличением.

Для определения мгновенного значения тока, протекающего через пятно, синхронно с их фоторегистрацией велось осциллографирование тока. Величина тока, протекающего через электрод, изменялась в пределах от 15 до 100 а, магнитное поле менялось от 0 до 1.7 тл. Для получения больших токов индуцированное электрическое поле было направлено совместно с приложенным, т. е. канал МГД генератора работал в «тормозном» режиме. Поведение катодных пятен при переходе от индуцированного к «тормозному» режиму меняется мало. Это было отмечено в [7], где было показано, что при этом изменяется лишь знак электрического поля в ядре потока.

Измерение площади катодных пятен и скорости их перемещения проводилось с помощью микроскопа типа S15A/G. Для этой цели на под-

вижной каретке микроскопа, перемещающейся по осям  $x$  и  $y$ , устанавливалось специальное приспособление, с помощью которого можно было достаточно точно устанавливать фоторегистрограмму по отношению к фиксированным осям и измерить координаты пятен. Затем пятна снимались с помощью фотоприставки на фотопленку, после чего проектировались в увеличенном масштабе. В результате линейные размеры катодных пятен увеличивались в 50 раз. Ошибка в измерении размеров  $\sim 20\%$ .



Фиг. 1

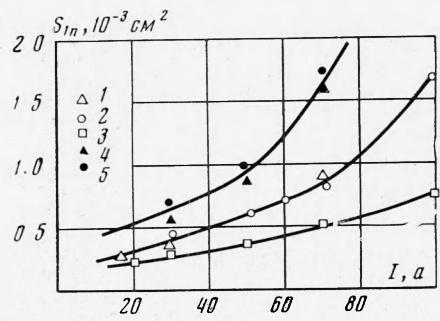
Измерение скорости перемещения катодных пятен проводилось по следовательным наложением указанных увеличенных проекций пятен на одну кальку, на которой последовательно очерчивались контуры пятна по отношению к фиксированным осям координат. Таким образом можно было установить картину движения пятен и измерить скорость его перемещения с ошибкой  $\sim 15\%$ .

Появление и горение катодных пятен на медных полусферических электродах в каналах МГД генератора открытого цикла описано в [5,6]. При отсутствии тока между электродами вся поверхность электрода заносится слоем присадки толщиной  $\sim 0.3 \div 1$  м.м. При средней плотности тока от 50 до 200  $Ma/cm^2$  на катоде появляются катодные пятна в виде искр, которые под действием потока быстро перемещаются к центру катода, очищая на своем пути поверхность электрода от присадки. С появлением первых катодных пятен вольт-амперная характеристика имеет резкий излом: наблюдается значительное увеличение тока при небольшом повышении напряжения. По мере увеличения тока, протекающего через электрод, катодные пятна становятся более интенсивными и их количество возрастает, в результате чего первая половина электрода, омываемая набегающим потоком, быстро очищается от визуально заметного слоя присадки, который остается на второй половине электрода, где горение дуг не наблюдается.

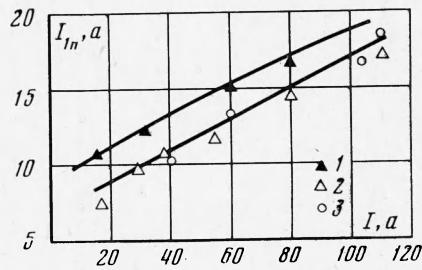
Начиная с токов  $15 \div 20$  а, катодные пятна в большей степени концентрируются в центральной части электрода (фиг. 1). Место горения пятен в этой зоне достаточно точно совпадает с границей отрыва потока и пограничного слоя при обтекании полусферы турбулентным потоком. Так как на второй половине электрода, т. е. в вихревой зоне, катодные пятна не горят (в исследованном диапазоне токов), в зоне отрыва потока, где концентрируются пятна, образуется граница слоя присадки с чистой поверхностью электрода. При других конфигурациях электрода, например крыловидной, основным местом горения катодных пятен также явля-

ется зона отрыва потока [6]. Аналогичная картина горения пятен в зоне отрыва потока наблюдается и на цилиндрических электродах [8]. При увеличении температуры поверхности электрода от 400 до  $600 \div 700^{\circ}\text{K}$  качественная картина характера появления и горения катодных пятен существенно не меняется.

На основании полученных экспериментальных данных можно отметить следующие основные закономерности в поведении катодных пятен.



Фиг. 2



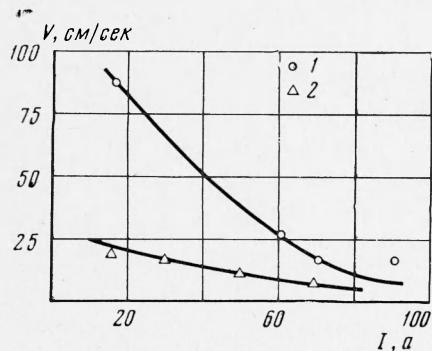
Фиг. 3

Поведение катодных пятен существенно зависит от зоны, в которой они горят. Начиная с токов  $15 \div 20\text{ а}$ , частота появления пятен в зоне отрыва потока в несколько раз превышает частоту появления пятен в зоне безотрывного обтекания электрода. В зоне набегания потока они двигаются, как правило, поступательно по направлению потока со скоростью  $\sim 2 \cdot 10^2\text{ см/сек}$ , имеют сравнительно небольшие площади и время жизни их мало ( $100 \div 200\text{ мксек}$ ). В зоне отрыва потока скорость пятен в среднем на порядок меньше, пятна двигаются хаотично (по мере улетучивания присадки) в пределах области, соизмеримой с их размерами. Время жизни пятен в несколько раз больше, чем в зоне набегания потока. Площади, занимаемые одним пятном, в  $1.5 \div 2$  раза больше, чем в зоне набегания потока (фиг. 2, кривые 1, 2 — площади одного пятна в зоне отрыва потока, 3 — в зоне набегания потока).

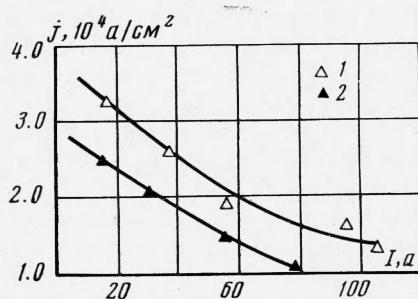
С увеличением протекающего через электрод тока от 15 до  $100\text{ а}$  наблюдается увеличение частоты появления пятен от  $2 \div 5$  до  $10 \div 15\text{ кгц}$ , одновременно растет среднее время жизни пятен в зоне отрыва потока (от  $150 \div 200$  до  $600 \div 800\text{ мксек}$ ) и наибольшее вероятное количество одновременно горящих пятен (от  $1 \div 2$  до  $7 \div 9$ ). Как показывает обработка осциллограмм совместно с фотографиями с ростом тока на электрод от 15 до  $100\text{ а}$  наблюдается рост среднего значения тока на одно пятно (фиг. 3, кривая 1 — зависимость среднего тока, протекающего через одно пятно, от общего тока для электрода с температурой поверхности  $600 \div 700^{\circ}\text{K}$ ; 2 — зависимость среднего тока, протекающего через одно пятно, от общего тока для электрода с температурой поверхности  $400 \div 450^{\circ}\text{K}$  при величине магнитного поля, равной нулю; 3 — зависимость среднего тока, протекающего через одно пятно, от общего тока для электрода с температурой поверхности  $400 \div 450^{\circ}\text{K}$  при величине магнитного поля, равной  $1.7\text{ тл}$ ).

Скорость движения катодных пятен в зоне отрыва при повышении среднего тока от 15 до  $100\text{ а}$  падает в несколько раз как в присутствии магнитного поля при  $B = 1.7\text{ тл}$ , так и без него (фиг. 4, кривая 1 — зависимость скорости перемещения катодных пятен от общего тока, протекающего через электрод, с температурой поверхности  $400 \div 450^{\circ}\text{K}$  при  $B = 1.7\text{ тл}$ , 2 — при  $B = 0$ ).

Имеет место снижение средней плотности тока в пятнах от  $2.5 \div 3.5 \cdot 10^4$  до  $1 \div 1.5 \cdot 10^4$  а/см<sup>2</sup> (фиг. 5, кривая 1 — зависимость плотности тока в пятне от общего тока, протекающего через электрод, с температурой поверхности  $400 \div 450^\circ\text{K}$ ; 2 — с температурой поверхности  $600 \div 700^\circ\text{K}$ ) и резкое увеличение площади пятен (см. фиг. 2, где кривая 1, 2 — площади катодных пятен на электроде с температурой поверхности  $400 \div 450^\circ\text{K}$ ; 4, 5 — с температурой поверхности  $600 \div 700^\circ\text{K}$ ).



Фиг. 4



Фиг. 5

В присутствии магнитного поля ( $B = 1.7$  тл) пятна на электроде с температурой поверхности  $400 \div 450^\circ\text{K}$  приобретают в зоне отрыва большую скорость (см. фиг. 4, кривая 1). Они двигаются более направлено и концентрируются на верхнем и нижнем краях электрода.

При наложении магнитного поля время жизни пятен падает, а частота их появления увеличивается в  $1.5 \div 2$  раза. С повышением температуры поверхности электрода до  $600 \div 700^\circ\text{K}$  наложение магнитного поля не влияет на указанные характеристики. Во всем диапазоне исследованных температур электрода магнитное поле не влияет на площадь пятен (см. фиг. 2, кривая 2 — площадь катодных пятен на электроде с температурой поверхности  $400 \div 450^\circ\text{K}$  при  $B = 1.7$  тл; 5 — площадь катодных пятен на электроде с температурой поверхности  $600 \div 700^\circ\text{K}$  при  $B = 1.7$  тл), на ток на одно пятно (см. фиг. 3) и на наиболее вероятное количество пятен.

При одинаковом среднем токе на электроде повышение температуры поверхности от  $400 \div 450$  до  $600 \div 700^\circ\text{K}$  приводит к росту площади пятен в  $1.5 \div 2$  раза (фиг. 2, кривые 1, 4), незначительному уменьшению наиболее вероятного количества пятен и увеличению среднего тока на одно пятно.

Указанные закономерности в поведении катодных пятен связаны с особенностями работы холодных электродов в канале МГД генератора. Эти особенности состоят в обтекании поверхности электрода потоком низкотемпературной плазмы и образовании сравнительно холодного газодинамического и теплового пограничных слоев, обладающих большим электрическим сопротивлением.

Из-за низкой температуры поверхности  $400 \div 700^\circ\text{K}$  электронная эмиссия с электродов мала, поэтому при больших напряжениях между плазмой и электродом у поверхности последнего образуется тонкая зона пространственного заряда с большим градиентом электрического поля, прохождение тока через которую обеспечивается диффузией ионов к поверхности [9]. При создании у поверхности электрода электрического поля, достаточного для возникновения электрического пробоя, на поверхности электрода возникают катодные пятна.

При уменьшении толщины пограничного слоя напряжение пробоя падает, так как при этом уменьшается толщина зоны пространственного заряда, что приводит к увеличению электрического поля у поверхности электрода.

При обтекании выдвинутых в поток электродов на их поверхности образуются три зоны: 1 — зона набегания потока, в которой пограничный слой невелик и градиент скорости у поверхности электрода достаточно большой; 2 — зона отрыва пограничного слоя, в которой градиент скорости потока у поверхности близок к нулю; 3 — вихревая зона. Так как вблизи лобовой точки полусферы толщина пограничного слоя минимальна, первые микродуги появляются именно в этой зоне. Вероятно, под действием набегающего потока, градиент скорости которого в этой зоне довольно большой (т. е. скорости потока, обдувающего дугу вблизи поверхности также сравнительно велики), область сжатия дугового столба вблизи пятна смещается по направлению потока. В результате над частью поверхности катодного пятна, расположенной ниже по потоку, увеличивается концентрация электронов и ионов. Согласно [10] такая асимметрия распределения концентраций ионов и электронов и плотности тока в пятне может привести к тому, что под действием ионной бомбардировки эта часть пятна разогревается более интенсивно и катодное пятно смещается на новое место (в данном случае вниз по потоку).

По мере возрастания приэлектродного падения напряжения при росте среднего тока, протекающего через электрод, возникают условия для электрического пробоя и образования пятен и в зоне отрыва потока, что и наблюдается, начиная с  $I = 15 \div 20$  а. Электрические дуги, которые горят в зоне отрыва потока, практически не подвергаются воздействию набегающего потока, так как в этой зоне градиент скорости потока у поверхности близок к нулю. Поэтому катодные пятна в этой зоне перемещаются хаотично со скоростью  $1 \div 2 \cdot 10$  см/сек, т. е. на порядок меньшей, чем в зоне набегания потока.

Условия для горения катодных пятен в зоне отрыва потока более благоприятны, чем в зоне набегания потока из-за его меньшего воздействия на дуги и образования границы присадки и «чистой» поверхности. Поэтому катодные пятна предпочтительно горят в зоне отрыва потока и частота их появления здесь больше.

При увеличении среднего тока, протекающего через электрод, приэлектродное падение напряжения плазма — электрод растет, в результате чего вероятность образования новых пробоев увеличивается. Это приводит к тому, что с увеличением среднего тока повышается частота появления катодных пятен, а следовательно, учитывая увеличение времени жизни пятен, растет и число одновременно горящих пятен.

Механизм образования пятен на электродах в канале МГД генератора, вероятно, существенно отличается от механизма, имеющего место при работе электродов в обычных газовых средах или в вакууме, где число катодных пятен с ростом общего тока увеличивается преимущественно за счет деления катодного пятна (сноска на стр. 17), в результате чего при увеличении общего тока средний ток на одно пятно и средняя площадь одного пятна остаются постоянными. На электродах в канале МГД генератора увеличение числа катодных пятен при увеличении общего тока происходит в основном за счет новых пробоев, причем площади пятен и средний ток на одно пятно растут.

Изменение скорости движения и размеров пятен, вероятно, вызвано также тем, что при увеличении среднего тока, длительно протекающего через электроды в МГД генераторе, температура поверхности повышается. При увеличении температуры поверхности материал катода (меди)

значительно активнее взаимодействует с химически агрессивной средой в канале МГД генератора, в результате чего на электроде образуются окисные пленки. Катодные пятна, которые горят на окисных пленках, имеют большие размеры, а скорость их перемещения и плотность тока в пятнах падают<sup>1</sup>. Существенное увеличение площадей катодных пятен при повышении средней температуры поверхности электродов от 400 до  $600 \div 700^\circ\text{K}$  также может быть объяснено более интенсивным образованием окисных пленок. Второй причиной увеличения площадей пятен с повышением температуры электродов может быть заметное снижение теплопроводности меди вблизи поверхности электродов, и особенно вокруг пятен.

Магнитное поле существенно влияет на поведение катодных пятен. При высоких давлениях в различных газах катодные пятна под действием магнитного поля приобретают движение, направленное в соответствии с правилом Ампера.

На холодных медных электродах в зоне набегания потока влияние магнитного поля на движение катодных пятен практически не наблюдается, так как в этой зоне градиент скорости потока у поверхности велик, и поток гонит дугу навстречу силе, действующей на нее со стороны магнитного поля. Так как воздействие потока превалирует, пятно не меняет направление своего движения в присутствии магнитного поля. В зоне отрыва потока катодные пятна приобретают более направленное движение. Так как при  $B = 1.7 \text{ тл}$  проявляется эффект Холла ( $\omega\tau = 1 \div 1.5$ ), то катодные пятна концентрируются в основном в верхней и нижней частях электрода.

Поступила 2 X 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Дикс Дж. Б., Ву И. К. Л., Крауфорд Л. В., Коестер Дж. К., Мюльхаузер Дж. В., Эдвартс Л., Чанг П., Стефенс Дж. В.* Характеристики семейства серийных МГД генераторов открытого цикла. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы, 1970, № 9.
2. *Адамс Р. К., Робинсон Е.* Процессы на электродах МГД генератора. Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике, 1958, т. 56, № 9.
3. *Дикс Дж. Б., Ву И. К. Л., Денцел Д. Л., Кроуфорд Л. В., Мюльхаузер Дж., Чанг П., Шанклун Р. В., Зицоу Ю.* Некоторые результаты исследования генератора с диагонально проводящими стенками. МГД метод получения электроэнергии. М. «Энергия», 1971.
4. *Зеликсон Ю. М., Кириллов В. В., Решетов Е. П., Флид Б. Д.* Некоторые закономерности работы металлических электролов МГД генератора. Теплофизика высоких температур, 1970, т. 8, № 1.
5. *Залкинд В. И., Кириллов В. В., Ларионов Ю. А., Маркина А. П., Пищиков С. И., Семенов Н. С., Шумяцкий Б. Я.* Исследование микродугового режима работы выступающих в потоке электролов в канале МГД генератора. Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии, вып. 3. М., «Энергия», 1972.
6. *Кириллин В. А., Шейндин А. Е., Шумяцкий Б. Я., Кириллов В. В., Буренков Д. К., Пищиков С. И., Любимов Г. А., Мостинский И. Л., Полетавкин П. Г., Раховский В. И.* Некоторые результаты исследований на модельной МГД установке У-02. В Международный симпозиум по магнитогидродинамическому методу получения электрической энергии, т. 1, Мюнхен, 1971.
7. *Залкинд В. И., Кириллов В. В., Ларионов Ю. А., Семенов Н. С.* Микродуговой режим работы электролов МГД-генератора. ПМТФ, 1970, № 1.
8. *Магнитогидродинамические генераторы открытого цикла.* М., «Мир», 1972.
9. *Герман В. О., Зекцер М. П., Любимов Г. А., Парфенов Б. В.* Экспериментальное исследование разряда между модулями холодной изоляционной стенки. В Международный симпозиум по магнитогидродинамическому методу получения электрической энергии, т. 1. Мюнхен, 1971.
10. *Кесаев И. Г.* Катодные процессы электрической дуги. М., «Наука», 1968.

<sup>1</sup> Зыкова Н. М. Исследование динамики развития катодных и анодных пятен электрической дуги Канд. дисс., Красноярск, 1967.