

4. Макаров Ю. В., Чекалин Э. К., Физические процессы в электромагнитных ударных трубах, М., Атомиздат, 1968.
5. Fowler R. C., Electrons as a hydrodynamical fluid. In: Advances in Electronics and Electron Phys., New York — London, Acad. Press, 1964, vol. 20.
6. Gross R. A., Strong ionizing shock waves. Rev. Modern Phys., 1965, vol. 37, № 4.
7. Чутлов Ю. И. К вопросу о природе движущейся плазмы, получаемой в электро-разрядной ударной трубке. Укр. физ. ж., 1967, т. 12, № 7.
8. Yushchenko N. I., Pomerantsev A. A., Nemchenko V. I. Influence of real gas effects on the hypersonic rarefied flow near the sharp leading edge of a thin plate. Internat. J. Heat and Mass Transfer, 1967, vol. 10, No. 1.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966, стр. 50—54, 316.
10. Диагностика плазмы. М., «Мир», 1967, стр. 153.
11. Чутлов Ю. И. Экспериментальное исследование взаимодействия импульсной движущейся аргоновой плазмы с поперечным магнитным полем. Магнитная гидродинамика, 1968, № 2.
12. Ahlborn B. Approximate calculation of the speed of sound in a plasma. Phys. Fluids, 1966, vol. 9, No. 9.
13. Haess E., Venzke D., Wojaczek K. Die Neutralgastemperatur in der Argon-Mitteldruckentladung. Beiträge Plasma Physik, 1967, Bd 7, II. 6.
14. Чутлов Ю. И. Отражение импульсной движущейся плазмы от металлической поверхности. Укр. физ. ж., 1968, т. 13, № 6.
15. Мак — Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. М., «Мир», 1967, стр. 209.
16. Краткий физико-технический справочник, т. 1. М., Физматгиз, 1960, стр. 331.

МИКРОДУГОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДОВ МГД-ГЕНЕРАТОРА

В. И. Залкинд, В. В. Кириллов, Ю. А. Ларионов, Н. С. Семенов

(Москва)

Излагаются предварительные результаты исследования работы электродов МГД-генератора при сравнительно больших плотностях тока. Опыты проводились в канале МГД-генератора, работающего на продуктах сгорания с охлаждаемыми металлическими электродами и электродами из карбида кремния. Наблюдение и съемка электродов показали, что при достаточно больших токах на поверхности электродов возникают микродуги. Рассматриваются феноменологические особенности поведения дуг в натуральных, специфических для МГД-генератора условиях. Существенное влияние на поведение дуг оказывает граница между электродом и изолятором, а также пленка соединений калия, высаждающихся на поверхности электродов. Указанные особенности поведения микродуг могут иметь большое значение для процессов электроэрозии электродов.

При испытаниях на установке У-02 МГД-генератора с охлаждаемыми металлическими электродами были достигнуты токи, величину которых трудно объяснить термоэмиссией с поверхности электродов, даже в случае образования на ней пленки калия. Так, в режиме короткого замыкания ток с пары электродов достигал $12a$, что соответствует средней плотности тока более $1a/cm^2$ при температуре поверхности металла $870-950^\circ K$. Были проведены визуальные наблюдения и съемки электродов, которые показали, что на поверхности электродов при таких плотностях тока возникают небольшие ярко светящиеся пятна. Эти пятна являются своеобразными микродугами, посредством которых осуществляется токовый контакт плазмы с электродами через холодный, мало проводящий пограничный слой.

О возникновении аналогичных пятен на поверхности электродов в приложенном электрическом поле упоминалось в работах [1] и [2]. Более подробно поведение микродуг позднее было описано в работах [3,5]. В данной работе было проведено изучение качественной картины горения микродуг на поверхности катода в натуральных условиях работы канала МГД-генератора.

МГД-генератор работал на продуктах сгорания природного газа с легкоионизирующейся присадкой поташа в количестве до 1% мольного по концентрации калия. Исследовались охлаждаемые водой электроды из нержавеющей стали IX18NiOT и электроды из карбида кремния (SiC) с небольшой добавкой тугоплавких металлов (Ti, Mo или Nb).

Каналы МГД-генератора имели прямоугольное сечение высотой 65—80 мм и шириной 220—270 мм. МГД-генератор имел секционированные электроды. Исследо-

вание и визуальные наблюдения микродуг проводились на парах электродов, расположенных на расстоянии 200 мм от входа потока в магнитное поле для металлических электродов и 500 мм для электродов из SiC. Электроды имели прямоугольную форму; высота электрода равнялась высоте канала, ширина электродов из IX 18НЮТ составляла 18 мм и для электродов из SiC — 30 мм. Межелектродные изоляционные промежутки составляли 15 мм и 20 мм соответственно. Изоляторами между металлическими электродами служили пластины из плотной окиси алюминия или окиси магния, а также покрытие из окиси алюминия толщиной 0,5—0,8 мм, наносимое газопламенным напылением на металлические охлаждаемые проставки. При работе с электродами из карбида кремния изоляцией между ними служил высокоглиноземистый бетон.

В дальнейшем в канал был поставлен охлаждаемый водой круглый электрод из нержавеющей стали диаметром 20 мм, что позволило наблюдать и производить съемку всей поверхности электрода и прилегающих к ней участков межелектродной изоляции.

Течение плазмы в канале было дозвуковым, скорость потока в разных опытах менялась от 400 до 650 м/сек при давлении в канале 0,60—0,73 бар. Температура в ядре потока измерялась методом обращения спектральных линий и изменялась от 2150° К до 2300° К при работе в режимах с кислородным обогащением. Температура металлических электродов при указанных параметрах потока в номинальном режиме была 770—820° К и в режимах с кислородным обогащением 870—950° К; температура электродов из карбида кремния была соответственно 1480—1520° К и 1920—1980° К.

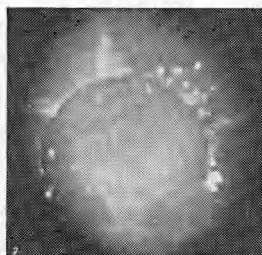
Температура на поверхности электродов определялась с помощью термопар, заложённых в электрод, поправка на глубину закладки спая определялась по измеренной плотности теплового потока. На электродах из SiC температура поверхности определялась оптическим методом с помощью оптического пирометра ОППИР-017, визируемого на поверхность электрода через поток плазмы. Кроме того, температура электродов измерялась на расстоянии 5—7 мм от поверхности, омываемой газом. Для этого использовался оптический микропирометр ОМП-49, который визирувался на дно отверстия, сделанного в электроде.

В опытах измерялись электрические характеристики секционированного генератора при одновременном ступенчатом изменении нагрузки на всех парах электродов; кроме того, плавные вольт-амперные характеристики отдельной пары электродов при отключении остальных пар. Такие характеристики записывались на двухкоординатный самопишущий потенциометр ПДС-01. Кроме того, с помощью ряда зондов, поставленных в изоляционной стенке, измерялось распределение потенциалов между анодом и катодом исследуемой пары электродов. Проводилось осциллографирование переменной составляющей тока, напряжения и разности потенциалов между катодом и ближайшим зондом. Визуальные наблюдения и съемка поверхности электрода производились через специальные отверстия в аноде. Для увеличения угла видимости дуг применялась специальная линза с фокусным расстоянием $F = 400$ мм, расположенная внутри магнита на расстоянии 900 мм от электрода. Фотосъемка проводилась фотоаппаратом «Зенит-3М» (объектив «Гелиос-44») с вспомогательными кольцами на черно-белую и цветную обратимую пленку чувствительностью 250 ед. ГОСТ и 22 ед. ГОСТ соответственно с выдержками от $1/125$ до $1/250$ при диафрагме 2. Киносъемка производилась аппаратами «Кварц» и «Лада» на черно-белую и цветную обратимую пленку чувствительностью 45 ед. ГОСТ и 22 ед. ГОСТ соответственно при скорости съемки 48 кадров в секунду.

В форсированных режимах с обогащением воздуха кислородом наблюдалось значительное увеличение светимости потока и стенки по сравнению с номинальным режимом. При этом поток становится менее прозрачным, и четкость изображения электрода ухудшается: контуры мест осаждения тонкой пленки соединений калия, край электрода, а также другие детали поверхности электрода, хорошо различимые в номинальном режиме (фиг. 1), видны менее ясно. Контрастность изображения микродуг на черно-белых



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

снимках при этом резко понижается, хотя микродуги достаточно хорошо заметны при визуальных наблюдениях.

В форсированных режимах с кислородным обогащением воздуха микродуги на металлических катодах обычно были хорошо различимы при токах $5 \div 6a$ (площадь электрода 11 см^2). Такие токи достигались в режимах, близких к короткому замыканию. Однако микродуги можно было наблюдать и при значительно меньших токах. На фиг. 2 и 3 приведены фотографии микродуг на поверхности круглого металлического электрода ($d = 25 \text{ мм}$), полученные при токах порядка $2a$ и $1a$ соответственно. Дуги были видны как ярко-белые движущиеся пятна, имеющие характерный радужный ореол. Микродуги наблюдались преимущественно около кромок электрода и значительно реже появлялись ближе к середине электрода. При этом одновременно наблюдалось несколько микродуг (до $5 \div 6$ в зависимости от тока). Наблюдаемая скорость перемещения микродуг была небольшой (около $0.5\text{—}1 \text{ см/сек}$); размеры святящейся области дуг составляли $1 \div 2 \text{ мм}$.

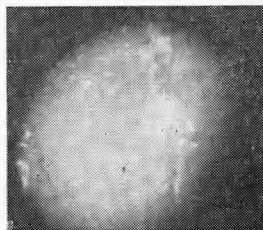
При сравнительно низкой проводимости плазмы в режимах без кислородного обогащения диапазон исследований по токам чрезвычайно ограничен величиной индуцированного $u \times B$ поля. Значительно большие токи при низкой проводимости плазмы можно получить в тормозном режиме МГД-канала, когда внешнее поле направлено согласно с индуцированным. Использование этого приема позволило существенно расширить диапазон исследований по величине тока и другим параметрам, сохранив натурные условия работы канала МГД-генератора.

Благодаря присутствию магнитного поля условия развития и поведения микродуг в этих опытах сохраняются близкими к реальным условиям работы МГД-генератора. Как показывают наблюдения, поведение дуг в чисто генераторном режиме внешне мало отличается от их поведения в «тормозном» режиме. Это подтверждает принципиальное сходство условий существования микродуг в тормозном и генераторном режимах, так как, очевидно, распределение потенциалов плазмы в приэлектродных областях и поведение дуг зависит только от величины и направления тока и индукции магнитного поля. Условия проведения данных опытов отличались от условий в работах [3,5] главным образом присутствием магнитного поля. Влияние магнитного поля на поведение дуг сказывается, в частности, на скорости их передвижения в связи с взаимодействием тока с магнитным полем. Определенную роль играет также перераспределение плотности тока в областях его диффузионного протекания под действием эффекта Холла.

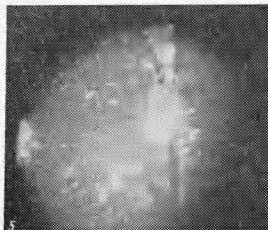
Исследование проводилось в магнитном поле при изменении индукции от 0 до $1,8 \text{ тл}$ и при изменении тока от 0 до $25a$, что соответствует плотности тока $2 \div 2,5 a/\text{см}^2$; микродуги на металлических электродах появлялись при токах $2 \div 2,5a$. Стабильное горение микродуг имело место при токах около $4 \div 5a$. Характерно, что для круглого металлического электрода с меньшей поверхностью токи появления микродуг и минимальные токи их стабильного горения были приблизительно такими же, как и на прямоугольных электродах. Приблизительно при таких же токах появлялись дуги и на электродах из SiC.

Интересно отметить, что характерным местом горения наиболее сильных дуг является граница между катодом и расположенным за ним изолятором. Обычно выделялась одна наиболее яркая дуга, которая двигалась вертикально по кромке катода на границе с изоляцией (фиг. 4). Скорость передвижения таких дуг по кромкам, насколько можно судить из визуального наблюдения, составляла $2 \div 3 \text{ мм/сек}$. При дальнейшем увеличении тока катодные пятна появляются также и на передней кромке электрода, но по размерам они меньше пятен, расположенных ниже по потоку (фиг. 5). По мере увеличения тока размеры и яркость дуг увеличивались, появлялось большее количество дуг на кромке (фиг. 6). При отключении тока микродуги пропадали, и при повторении опытов возникали вновь в тех же характерных местах.

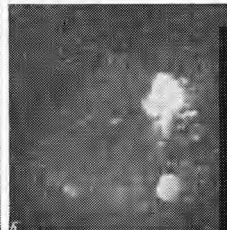
Весьма интересным является роль пленки поташа и других соединений калия, осаждающихся на поверхности электрода. Как показали наблюдения, микродуги, как правило, горят в местах осаждения пленки. В опытах с круглым электродом дуги



Фиг. 4



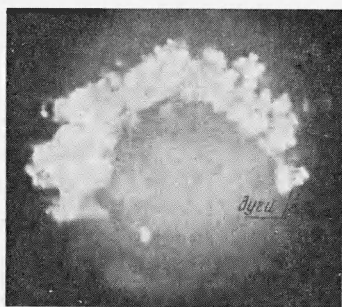
Фиг. 5



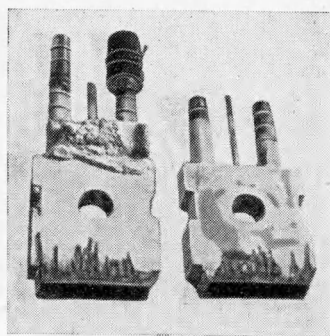
Фиг. 6

горели одновременно в нескольких местах около края электрода, где пленка поташа была наиболее горячей (фиг. 7). Места, покрытые пленкой поташа, имели большую температуру и поэтому большую светимость (на приведенной фигуре — обширная светящаяся область сверху). Наблюдения показали, что дуги могут гореть не только на поверхности электрода, но и на поверхности изолятора около края электрода в тех местах, где изолятор порыв пленкой поташа, причем последняя, по-видимому, осуществляла электрический контакт между пятном и электродом.

Вероятно, преимущественное горение микродуг на пленке или на ее границе можно объяснить существенно более высокой температурой поверхности пленки и ее сравнительно низкой теплопроводностью. При малой теплопроводности пленки скорость перемещения пятен может оказаться существенно выше [6], а в силу большой шероховатости пленки на ней могут быть облегчены условия автоэлектронной эмиссии. Катодные пятна на подобных пленках более близки к пятнам первого типа по классификации работы [6] и должны вызывать меньшую эрозию материала катода.



Фиг. 7



Фиг. 8

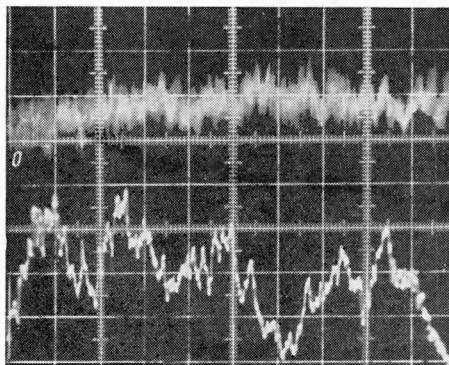
С увеличением магнитного поля от 0 до $1,8 \text{ тл}$ при неизменном приложенном напряжении визуально наблюдалось значительное увеличение числа катодных пятен и нестабильность их горения, хотя ток при этом изменялся незначительно (приблизительно на 20%). Малое изменение тока, вероятно, объясняется увеличением параметра Холла и снижением эффективности проводимости плазмы при одновременном увеличении индуцируемой э.д.с., что в большой мере взаимно компенсируется.

В опытах с металлическими электродами дуги на границах электрода и изолятора проникали в зазор между поверхностями электрода и изолятора. Горение этих дуг происходило на достаточном расстоянии от поверхности электрода, омываемой потоком, и было довольно стабильным. При осмотре канала с металлическими электродами было обнаружено, что в местах, где наиболее часто наблюдались катодные пятна, имеются следы оплавления электрода и образования застывшего шлака. На боковой поверхности катода, равно как и на смежной боковой поверхности изолятора напыление было изъедено дугами, наблюдались углубления в виде лунок неправильной зигзагообразной формы; так как зазор между поверхностями был очень мал, картина разрушения напыления от горения дуг в зазоре на обеих поверхностях симметрична (фиг. 8). При работе с круглым металлическим электродом, окруженным изоляцией из плотной окиси алюминия, также было замечено горение дуг в зазоре между электродом и изолятором, которое сопровождалось локальным оплавлением катода с образованием характерных следов на поверхности металла и расположенного рядом изолятора.

Как указывалось, в опытах проводилось измерение распределения потенциалов зондов, расположенных между анодами и катодами исследуемых пар металлических электродов. С увеличением тока от 0 до $4 \div 6 \text{ а}$ при $B = 1,8 \text{ тл}$ разность потенциалов между катодом и ближайшим к нему зондом, расположенным на расстоянии около 10 мм , возрастает от $10 \div 20$ до $100 \div 130 \text{ в}$. Очевидно, эта разность потенциалов складывается из истинного прикатодного падения около пятна, падения в опирающейся на пятно контрагированной дуге и падения в слое плазмы, где протекание тока можно считать уже диффузным. По известным данным (например, [7]), прикатодное падение для медных и железных катодов равно $15 \div 16 \text{ в}$, а для натриевого катода $5 \div 9 \text{ в}$, т. е. истинное прикатодное падение, по-видимому, составляет небольшую часть общего падения в приэлектродной области.

Измерение приэлектродных падений потенциала с помощью зондов в микродуговых режимах осложняется тем, что разность потенциалов между зондом и электродом зависит, очевидно, от взаимного расположения зонда и ближайших к нему микродуг. След-

ствие движения микродуг по поверхности электрода это взаимное расположение постоянно меняется. Переменная составляющая прикатодного падения имеет размах колебаний $5 \div 7$ в и частоту порядка $3 \div 6$ кгц (фиг. 9). На фиг. 9 приведены осциллограммы переменных составляющих тока $I_{\sim}$ (верхняя кривая) и прикатодного падения напряжения $\Delta V_{k\sim}$ на стальном электроде в канале МГД-генератора, работающем в генераторном режиме; величина постоянного тока равна 1 а. Масштабы осциллограмм: по току 0.36 а/см; по прикатодному падению напряжения 3 в/см; по времени 1 мсек/см (одно деление по фотографии соответствует 1 см).



Фиг. 9

Можно предположить, что указанная частота вызвана периодическим погасанием и зарождением на новом месте микродуг.

В заключение следует отметить, что проведенные опыты указывают на возможность заметной эрозии холодных электродов при наличии на их поверхности микродуг. Уменьшение электроэрозии возможно за счет быстрого движения пятен под действием магнитного поля и потока. Определенную защитную роль может оказывать пленка поташа и других соединений калия на поверхности электрода, так как скорость высаживания поташа на катод в условиях канала МГД-генератора и средняя скорость его уноса в катодных пятнах, отнесенная ко всей поверхности электрода, могут быть соизмеримы. Особенно опасно горение дуг между электродом и межэлектродным изолятором, где передвижение дуг под воздействием магнитного поля и потока затруднено и поэтому разрушительное воздействие дуги может проявляться наиболее сильно. С этим явлением следует бороться конструктивными мерами.

Поступила 3 III 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Девиме Р., Лекроарт Х., Хен Гуэн Дак, Понселе Дж., Рикатеу П. Измерение проводимости продуктов сгорания с добавками легкоионизируемого вещества. В сб.: «Магнитогазодинамические генераторы электрической энергии», М., ВИНТИ, 1961.
2. Croitoru Z., De Montardy A. Electrode phenomena tensor conductivity and electrode heating in speed argon. 4 th, Proc. Sympos. Engng. Aspects Magnetohydrodynam., USA, 1963.
3. Sumida A., Matsubara S., Ito T., Morikawa T., Murai Y. An experimental study on physical properties of combustion gas. Electricity from MHD, Vienna, 1966, vol. 3.
4. Барышев Ю. В., Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А., Парфенов Б. В. Регистрация дуговых разрядов на катоде модели МГД-устройства. ПМТФ, 1968, № 2.
5. Алферов В. И., Устинов Ю. С. и др. Исследование физической картины разряда между холодными электродами в сверхзвуковой струе плазмы с присадками. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, № 2.
6. Grakov V., Hermoch V., Formation of cathode spots on electrodes of short — time high — intensity electric discharge. Czech. J. Phys., 1963, Ser. B., vol. 13, No. 7, pp. 509—517.
7. Финкельбург В., Меккер Г., Электрические дуги и термическая плазма. М., Изд-во иностр. лит., 1961.