

## Сопоставление характеристик однофазной дуги с медными и стальными электродами в атмосфере азота и воздуха

© Г.Г. Антонов, В.Б. Ковшечников, А.В. Гнедовский

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,  
191186 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: not\_na@front.ru

(Поступило в Редакцию 12 мая 2010 г.)

Представлены результаты исследования характеристик однофазной открытой дуги с газовой стабилизацией в электродных узлах в атмосфере азота и воздуха с медными и стальными электродами. Амплитудные значения тока и напряжения составляют 9–10 А и 650–1600 В соответственно. Проводятся осциллограммы тока и напряжения, динамические вольт-амперные характеристики. Сопоставляются временные зависимости проводимости и значения мощности разряда, спектральный состав и интегральные потери на излучение дугового столба при использовании в качестве электродов вышеназванных материалов.

### Введение

Поиск источников энергии, альтернативных ископаемых, а также экологические проблемы, связанные с обеззараживанием и обезвреживанием отходов, стимулируют возрастающий интерес к разработке новых и усовершенствованных традиционных методов переработки [1–10]. Среди наиболее перспективных можно назвать методы плазменной переработки. В частности, плазменный пиролиз и газификация позволяют получать из отходов горючий синтез-газ, а высокотемпературная минерализация токсичных и опасных отходов является эффективным способом их утилизации [1,10]. В основе этой технологии лежит применение низкотемпературной плазмы, источником которой служат сильноточные дуговые разряды, или плазмотроны.

Использование плазмотронов в промышленных масштабах крупнотоннажных производств выдвигает в ряд первостепенных задач создание высокоэффективных устройств, способных стационарно функционировать с различными газами. Наиболее проблемным узлом плазмотронов являются электроды, существенно ограничивающие ресурс непрерывной работы генератора плазмы [11–13]. В этой связи поиск новых эрозионно-стойких материалов остается насущной задачей. Однако от материала зависят не только эрозионные свойства самих электродов, но и характеристики плазмотрона, и параметры генерируемой им плазмы. Некоторые аспекты этих зависимостей являются предметом настоящей работы.

В силу сложности газодинамических, эмиссионных и ионизационных процессов в электродуговой камере трехфазного плазмотрона [12] в качестве объекта исследования использовалась однофазная открытая дуга с газовой стабилизацией в электродных узлах (рис. 1). Важным доводом в пользу такого выбора является возможность построения динамической вольт-амперной характеристики (ВАХ) и наблюдения за изменением сопротивления дугового промежутка в течение периода

тока в результате воздействия материала электродов на такую важнейшую характеристику плазмы, как проводимость, и производных от нее — мощность разряда и эффективность ввода энергии в газ.

Кроме того, однофазные плазмотроны представляют самостоятельный интерес, поскольку находят применение, например, в качестве инжектора, обеспечивающего зажигание дуг в трехфазном плазмотроне со скользящими дугами [14,15]. К тому же физические процессы, определяющие влияние материала электродов на параметры плазмы и внешние характеристики разряда, имеют достаточно универсальный характер. Их учет представляется важным при разработке реальных конструкций плазмотронов.

### Описание эксперимента

Принципиальная схема устройства для исследования однофазной открытой дуги представлена на рис. 1. Водяохлаждаемые цилиндрические втулки внутренним диаметром 32 мм выполнены из нержавеющей стали. Рабочий газ вводится тангенциально. Сменные электроды диаметром 25 мм имеют кольцевые утолщения, образуя в зоне ввода газа пробиваемый при подаче напряжения промежутки. Торцы электродов удалены от торцов втулок на 80 мм, а суммарное расстояние

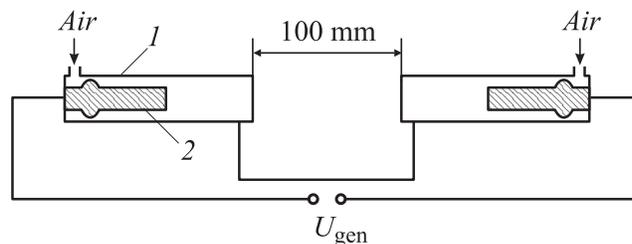


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — втулка, 2 — электрод.

между электродами — 260 mm. Инициированный в результате пробоя дуговой разряд, стабилизированный потоком газа, замыкается в виде струй плазмы за пределами втулок. Рабочая среда — воздух или азот при атмосферном давлении. Применялись электроды из меди и стали марки 3. Выбор этих металлов обусловлен тем, что применение композиционных материалов на основе меди и железа позволяет увеличить эрозионную стойкость электродов [11,13] и находит практическое применение, в частности, для плазмотронов мощностью 6 kW [16]. Источник питания — промышленная сеть со специальным высоковольтным трансформатором ( $U_{\text{off-load}} = 6000 \text{ V}$ ,  $I_{sc} = 10 \text{ A}$ ). Ток и напряжение измерялись с помощью Scope Meter Fluke S196.<sup>1</sup> Для регистрации спектрального состава излучения использовался спектрограф Instaspec MS257<sup>TM</sup> с дифракционной решеткой 1200 lines/mm и детектором Andor CCD Version 2B. Относительная величина светового потока измерялась сдвоенным термоэлектрическим измерителем энергии импульсов лазеров с твердотельной поглощающей нагрузкой ИМО-2. Скоростная видеосъемка дугового промежутка производилась камерой HiSIS 2000 Version 1.32. Синхронно с током разряда измерялись и интенсивности линий триплета атомарного кислорода  $3S^5S_2-3P^5P_{3,2,1}$  на длине волны 777 и отдельных линий меди и железа (монокроматор, ФЭУ-180).

В силу более низкого, по сравнению с рабочим газом, потенциала ионизации атомов металлов они играют роль легко ионизируемой добавки, оказывая существенное влияние на процессы ионизации в период формирования разряда. Поэтому сам факт воздействия материала электродов на параметры плазмы не вызывает сомнений. Однако характер и степень этого влияния нуждаются в дополнительных исследованиях.

Чтобы выделить влияние материала электродов на параметры плазмы, производилась поэтапная смена электродов и рабочего газа. При этом прочие условия проведения экспериментов (расстояния между электродами и их взаимное расположение, режим источника питания, расход газа, система регистрации электрических и оптических сигналов и др.) не изменялись. Поскольку в рассматриваемом случае вид  $I(t)$  задан источником питания, различия в параметрах дуги (при смене электродов и рабочего газа) определяются сопоставлением соответствующих временных зависимостей: напряжения  $U(t)$ , проводимости  $\sigma(t)$ , мощности  $W(t)$ , динамических ВАХ и проводимости дуги от мощности разряда. При построении этих зависимостей используются усредненные по 40 периодам зависимости  $U(t)$ . Среднеквадратичное отклонение в области наибольших отличий в значениях напряжения (по три точки до и после максимальной величины) представлена в табл. 1.

<sup>1</sup> Погрешность измерения электрических величин не превышала 1.5%.

**Таблица 1.** Среднеквадратичное отклонение в значениях напряжения

Электрод/ Рабочий газ	Максимальное напряжение, V	Среднеквадратичное отклонение, V
Сталь/Воздух	923	45.3
Медь/Воздух	1157	23.3
Сталь/Азот	900	18.6
Медь/Азот	1092	23.3

## Основные результаты

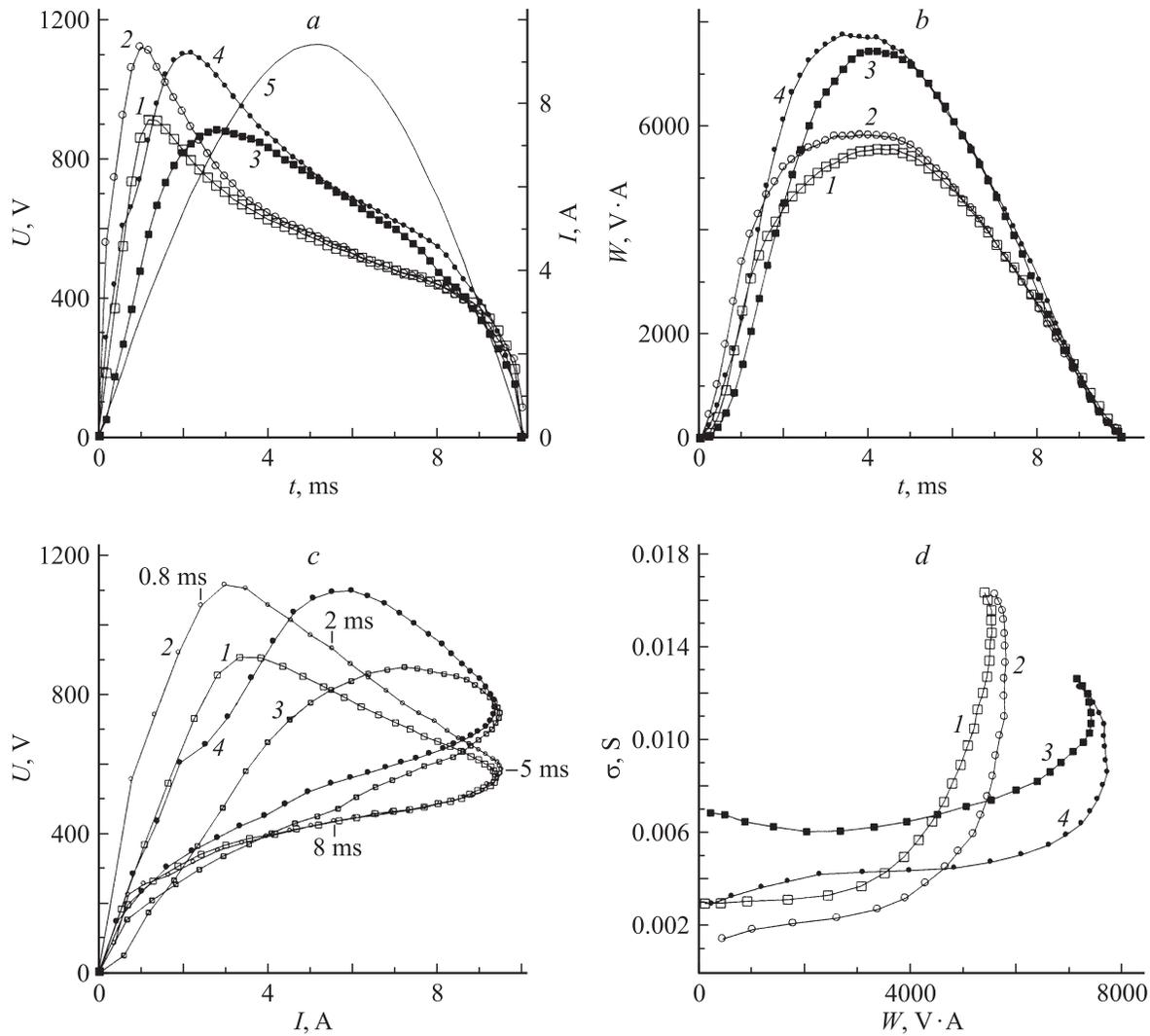
На рис. 2 представлены полупериоды тока и напряжения, а также построенные на их основе динамические характеристики разряда.

Как видно из рисунков, и в азоте, и в воздухе заметные расхождения на участке нарастания тока в первой четверти периода (0–5 ms) сменяются практически совпадающими кривыми для медных и стальных электродов — во второй. В этом отражается специфика разряда на переменном токе промышленной частоты, когда изменение параметров плазмы происходит в соответствии с изменением питающего напряжения. В начале периода, когда температура газа низка, наиболее существенное влияние на процессы ионизации на стадии формирования канала разряда оказывают атомы металла электродов (в качестве легко ионизируемой добавки). По мере роста тока и температуры газа все большее влияние на проводимость плазмы оказывают процессы термического возбуждения, ионизации и диссоциации молекул рабочего газа, что нивелирует различия, связанные с атомами металла электродов.

Поскольку проводимость является одной из важнейших характеристик плазмы (например, в случае использования плазмотрона в качестве инжектора), сравнение эффективности преобразования энергии, вложенной в разряд при смене электродов и рабочего газа, производилось сопоставлением соответствующих значений проводимости дуги. Результаты сравнения представлены в табл. 2, где помимо времени достижения максимальной за полупериод проводимости плазмы ( $t$ ) приводятся суммы мгновенных значений проводимости к этому моменту ( $\sigma$ ) и вложенная в разряд энергия ( $E$ ), а также коэффициент, характеризующий эффективность преобразования энергии электрического поля в ионизацию

**Таблица 2.** Эффективность преобразования энергии в фазе нарастания тока

Металл/Газ	$t$ , ms	$\sigma$ , S	$E$ , J	$k$	$k_{\text{norm}}$
Сталь/Воздух	5.6	0.277	23.815	0.01162	1.17
Медь/Воздух	5.6	0.265	26.629	0.00997	1.00
Сталь/Азот	6.4	0.310	33.094	0.00937	1.41
Медь/Азот	5.6	0.214	32.240	0.00663	1.00



**Рис. 2.** Динамические характеристики дугового разряда: *a* — падение напряжения и ток дуги, *b* — мощность, *c* — ВАХ, *d* — проводимость (0–5 ms); *1* и *2* — соответственно стальные и медные электроды, рабочий газ — воздух; *3* и *4* — стальные и медные электроды, рабочий газ — азот; *5* — ток дуги; расстояние между точками на кривых 0.2 ms.

газа в виде отношения этих величин:  $k = \sigma/E$  и  $k_{\text{norm}}$  — нормированный на меньшее значение коэффициент  $k$  для воздушной и азотной плазмы.

Как следует из анализа приведенных данных, в фазе нарастающего тока коэффициент  $k$  стальных электродов в воздушной плазме выше медных на 17%. В азотной плазме — на 41%. Влияние кислорода на проводимость плазмы проявляется при замене азота на воздух: со стальными электродами присутствие кислорода увеличивает  $k$  на 24% ( $k_{\text{Fe}} = 1.24$ ), с медными — на 50% ( $k_{\text{Cu}} = 1.5$ ).

Данные за полный период представлены в табл. 3.

Замещение медных электродов стальными увеличивает коэффициент  $k$  на 10% в воздушной плазме и на 28% — в азотной. Кислород воздуха увеличивает значение  $k$  со стальными электродами на 31%, с медными — на 53%.

Более высокая проводимость плазмы со стальными электродами (хотя расчетное значение равновесной концентрации атомов меди в условиях эксперимента несколько выше, а потенциал ионизации несколько ниже, чем у железа), по-видимому, связана с более развитой системой термов железа (спектр железа содержит 3257 линий, меди — 530 [17]).

**Таблица 3.** Эффективность преобразования энергии за период

Металл/Газ	$\sigma$ , S	$E$ , J	$k$	$k_{\text{norm}}$
Сталь/Воздух	1.078	69.778	0.015	1.10
Медь/Воздух	1.052	75.167	0.014	1.00
Сталь/Азот	0.975	82.992	0.012	1.28
Медь/Азот	0.839	91.545	0.009	1.00

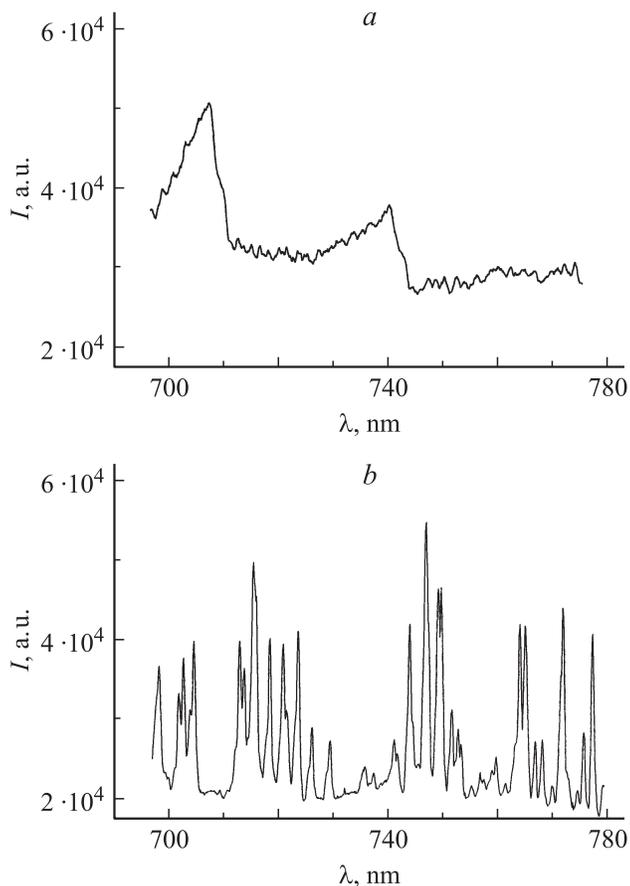


Рис. 3. Фрагменты спектра воздушной плазмы (695–775 ms): *a* — медные, *b* — стальные электроды.

На рис. 3 приводятся фрагменты одинаковых участков спектра воздушной плазмы при работе с медными (*a*) и стальными (*b*) электродами.

Большое количество возбужденных атомов в спектре железа с энергией возбуждения порядка 4 eV существенно облегчает ионизацию примеси при использовании стальных электродов. В результате стальной (железо-содержащей) электрод обеспечивает необходимый уровень проводимости при меньшей температуре плазмы. Соответственно уменьшается и падение напряжения на разрядном промежутке (рис. 2, *a*). При использовании для питания разряда источника тока изменение падения напряжения на дуге приводит к соответствующему изменению мощности (рис. 2, *b*).

Обилие возбужденных состояний в спектре в свою очередь обуславливает увеличение потерь на излучение, которые, по данным [18], могут достигать 20% от вложенной в разряд энергии.

Для измерения относительной величины светового потока излучение из наиболее стабильной зоны разряда (вблизи торца одной из втулок) в фиксированном телесном угле, ограниченном двумя диафрагмами диаметром 2 мм, подавалось на измеритель оптической мощности ИМО-2. Удельная энергия излучения воздушной плазмы

(интенсивность излучения, отнесенная к энергии, вложенной в разряд) со стальными электродами на 94% выше, чем с медными.

Из сопоставления эмиссионных спектров, полученных при использовании медных и стальных электродов, следует, что различия между ними не ограничиваются числом линий и их суммарной интенсивностью. Молекулярные полосы, наблюдаемые в области 460–550 nm (рис. 4, *a*) и 695–750 nm (рис. 3, *a*) при использовании медных электродов, практически отсутствуют для стальных электродов (рис. 3, *b*). Заметная конкуренция процессам возбуждения молекулярного спектра со стороны атомов железа характеризует соответствующие изменения в элементарных процессах преобразования и переноса энергии в энергетическом балансе открытой дуги при работе с медными и стальными электродами.

Обращает на себя внимание наличие в спектре дугового разряда воздушной плазмы высоко возбужденных состояний атомарного кислорода (рис. 4, *b*). В их числе триплет атомарного кислорода  $3S^5S_2-3P^5P_{3,2,1}$  на длине волны 777 nm с энергией возбуждения 10.73 eV, линии с  $\lambda = 615.8$  nm (12.75 eV) и  $\lambda = 844.6$  nm (10.98 eV). Как правило, их появление регистрируется в неравновесной плазме тлеющего разряда при низком давлении (миллиметры ртутного столба) и соответственно высоких значениях напряженности электриче-

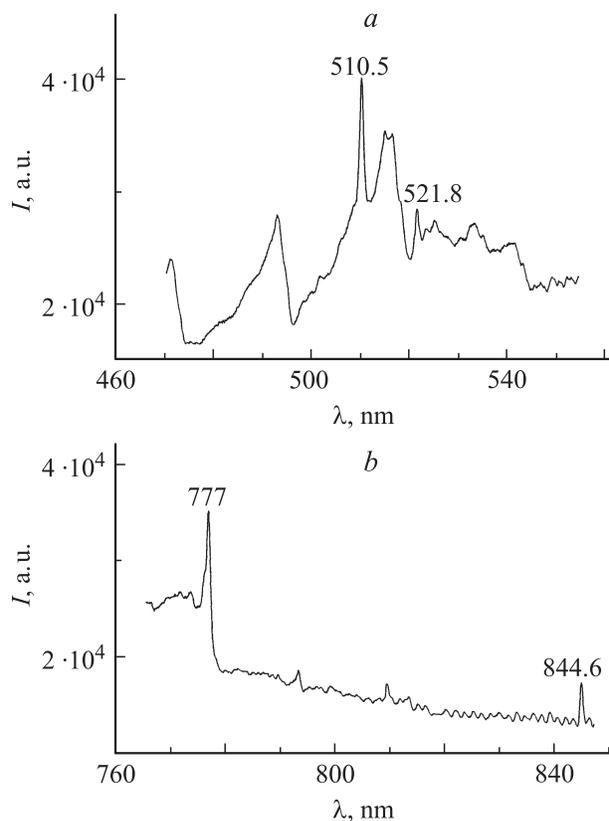
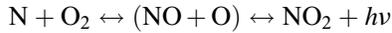


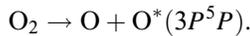
Рис. 4. Фрагменты спектра воздушной плазмы с медными электродами.

ского поля. При этом верхние уровни триплета  $3P^5P_{3,2,1}$  возбуждаются прямым электронным ударом [19].

В условиях дугового разряда при атмосферном давлении возбуждение спектральных линий носит более сложный характер и может происходить не только за счет электронов. В работах [20–22] образование атомарного кислорода связывается с процессом



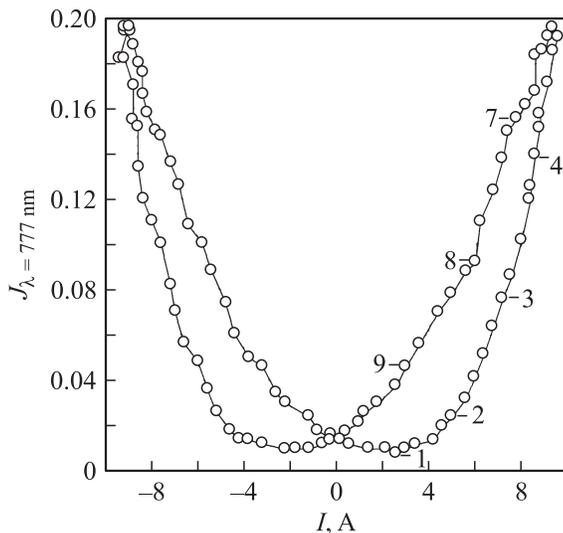
за счет смешения струи воздушной или азотной плазмы с окружающим холодным воздухом. В рассматриваемом случае нельзя исключать и процессы рождения возбужденных атомов кислорода при термической диссоциации молекул  $O_2$ :



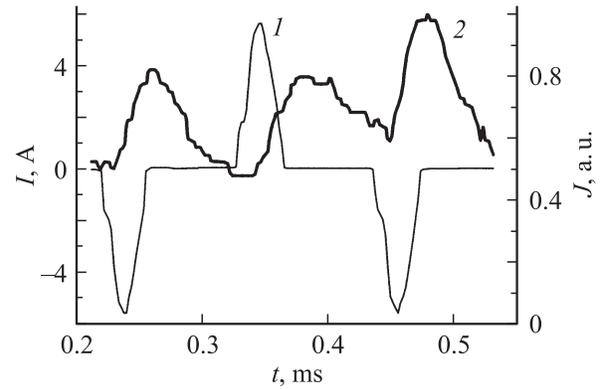
В пользу такого предположения свидетельствует рис. 5, где представлены измерения интенсивности линии триплета атомарного кислорода  $3S^5S_2-3P^5P_{3,2,1}$  (в относительных единицах) синхронно с током разряда за один период.

Как видно из рис. 5, интенсивность линии максимальна в максимуме тока (и соответственно при наибольшей среднемассовой температуре плазмы), а на растущем участке ВАХ при максимальных за период значениях напряженности электрического поля монотонно спадает, принимая минимальное значение при токе  $\sim 2$  А.

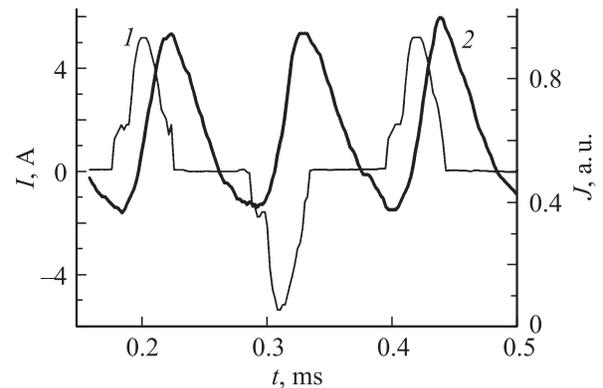
Исследование кинетики возбуждения и высвечивания спектральных линий меди и атомарного кислорода с временным разрешением  $2\mu s$  производилось при использовании для питания разряда высокочастотного источника (4.6 kHz) с паузами тока (длительность импульса тока 20–40  $\mu s$ , пауза — 60–80  $\mu s$ ). Обнаружен значительный временной сдвиг в высвечивании отдельных линий. Так, максимум интенсивности линии меди 578 nm отстает от



**Рис. 5.** Интенсивность линии с  $\lambda = 777 \text{ nm}$  в зависимости от тока разряда (цифры вдоль кривой — время в миллисекундах).



**Рис. 6.** Интенсивность линии меди синхронно с током разряда 4.6 kHz: 1 — ток разряда, 2 — линия меди  $\lambda = 578 \text{ nm}$ .



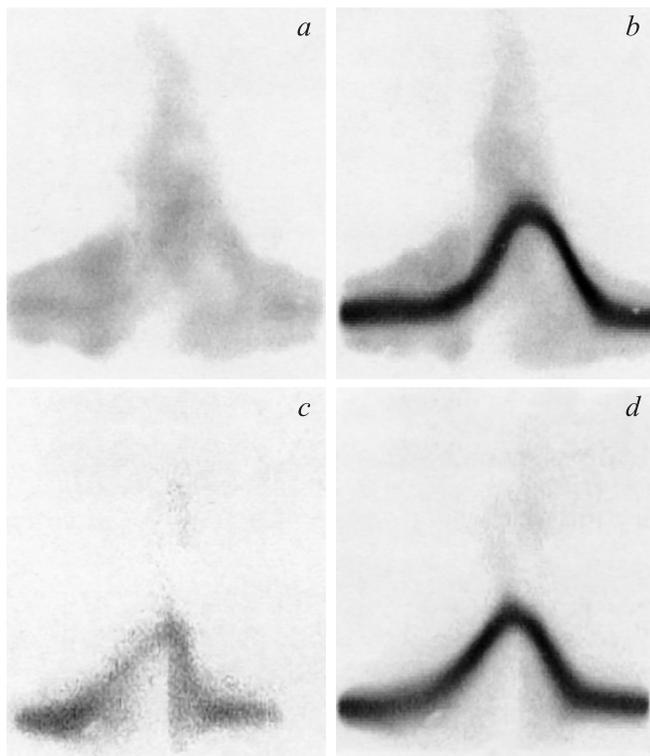
**Рис. 7.** Интенсивность линии атома кислорода синхронно с током разряда: 1 — ток, 2 — интенсивность линии  $\lambda = 777 \text{ nm}$ .

максимума тока примерно на  $28 \mu s$ , а время релаксации до среднего уровня составляет примерно  $74 \mu s$  вплоть до начала следующего возбуждающего импульса (рис. 6).

Отставание максимума интенсивности линии триплета атомарного кислорода  $777 \text{ nm}$  от максимума тока  $\approx 22 \mu s$ , время релаксации до среднего уровня  $\approx 60 \mu s$  (рис. 7).

При этом в паузе тока заселенность уровня в первом случае (линия меди) уменьшается примерно на 45%, во втором (линия кислорода) — на 60%. Наличие столь заметного фазового сдвига пульсаций интенсивности линий относительно разрядного тока является результатом сложного комплекса физико-химических процессов в плазме дугового разряда переменного тока в воздухе. Высокий уровень интенсивности спектральных линий бестоковой плазмы и затягивание их спада может объясняться вторичными процессами возбуждения и ионизации с участием метастабильных электронно-возбужденных молекул [23,24].

Анализ эволюции плазмы по кадрам скоростной видеосъемки (2.25 kHz, время экспозиции 0.4 ms) в спектральном диапазоне 650–2700 nm подтверждает наличие значительного объема бестоковой плазмы в межэлектродном пространстве. Наиболее яркое излучение



**Рис. 8.** Кадры скоростной видеосъемки (негативное изображение): *a* — нулевой; *b* — максимальный ток, стальные электроды; *c* — нулевой; *d* — максимальный ток, медные электроды.

плазмы регистрируется при использовании стальных электродов, а размеры светящейся зоны слабо зависят от величины тока дуги и при переходе через нуль имеют величину порядка 30 mm (рис. 8, *a*). Яркость и размеры бестоковой светящейся зоны с медными электродами значительно меньше (рис. 8, *c*). Световой диаметр токового шнура в максимуме тока и с медными, и со стальными электродами составляет  $\sim 7$  mm.

## Заключение

В работе представлены результаты исследования характеристик однофазной открытой дуги с газовой стабилизацией электродных узлов в атмосфере азота и воздуха с медными и стальными электродами: на примере железа и меди показано, что материал электродов оказывает существенное влияние на газоразрядную плазму — происходят соответствующие изменения в элементарных процессах, в проводимости, падают напряжение на дуге, мощность разряда, возникают потери на излучение; наиболее заметное воздействие на проводимость плазмы атомы металла электродов оказывают на стадии формирования канала разряда в фазе нарастания тока; замена медных электродов стальными и в воздушной, и в азотной плазме позволяет получить более высокую проводимость при меньших энергзатратах; энергия

излучения воздушной плазмы с медными электродами на 90% ниже, чем со стальными; при использовании в качестве рабочего газа молекулярного газа возбуждение спектральных линий металла носит сложный характер, так как может происходить не только за счет электронов, но и за счет метастабильных состояний молекул; присутствие в плазме дугового разряда заметной концентрации высоко-возбужденных состояний атомарного кислорода оказывает влияние на характеристики плазмы и в силу своей химической активности может представлять значительный интерес для использующих окислительные процессы плазмохимических технологий.

Результаты исследования характера и степени влияния материала электродов на параметры плазмы представляют интерес для обоснованного выбора легирующих добавок при разработке специальных сплавов высокотемпературных электродов.

## Список литературы

- [1] Herrmann H., Henins J. et al. // Phys. Plasmas. 1999. Vol. 6. P. 2284.
- [2] Bratsev A.N., Rutberg Ph.G., Ufimtsev A.A. // J. High Temp. Mater. Proc. 2004. Vol. 8. P. 433.
- [3] Van der Drift A., Boerrigter H. // SYNBIOS Conf. Stockholm, Sweden, 2005. Rep. ECN-C-06-001.
- [4] Братцев А.Н., Попов В.Е., Рутберг А.Ф. и др. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 44. С. 832.
- [5] Hrabovsky M., Konrad M., Kopecky V. et al. // J. High Temp. Mater. Proc. 2006. Vol. 10. P. 557.
- [6] Bratsev A.N., Popov V.E., Shtengel S.V., Rutberg A.Ph. // J. High Temp. Mater. Proc. 2006. Vol. 10. P. 549.
- [7] Попов С.Д., Рутберг А.Ф., Сафронов А.А. // ТВТ. 2007. Т. 45. № 1. С. 5.
- [8] Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Наконечный Г.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 9. С. 77.
- [9] Горбунов В.П., Наконечный Г.В., Никонов А.В. и др. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 9. С. 35.
- [10] Laroussi M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. Vol. 24. P. 1188.
- [11] Виноградов С.Е., Рыбин В.В., Рутберг Ф.Г. и др. // Вопр. материаловедения. 2002. № 2 (30). С. 52.
- [12] Антонов Г.Г., Братцев А.Н., Рутберг Ф.Г. // ПТЭ. 1997. № 4. С. 90.
- [13] Ковшечников В.Б., Литвинов Н.И., Наконечный Г.В. и др. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2005. № 1. С. 56.
- [14] Rutberg Ph.G., Safronov A.A., Popov S.D. et al. // Plasma Phys. Cont. F. 2005. Vol. 47. P. 1681.
- [15] Рутберг Ф.Г., Сафронов А.А., Горячев В.Л. // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 80.
- [16] Рутберг Ф.Г., Павлов А.В., Попов С.Д. и др. // ТВТ. 2009. Т. 47. № 2. С. 193.
- [17] Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. М.: Физматгиз, 1962. 608 с.
- [18] Александров А.Ф., Азеддин Б., Скворцов М.Г. и др. Все-союз. 6-ой Тез. докл. конф. по физике низкотемпературной плазмы. 1983. Т. 1. С. 381.
- [19] Ионих Ю.З., Куранов Ф.Л., Ермолов Ю.В. // Там же. С. 86.
- [20] Бублиевский А.Ф., Галиновский А.А., Горбунов А.В. и др. // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 4. С. 4.

- [21] *Prebola J.L., jr.* Performance of plasma torch with hydrocarbon feedstocks for use in scramjet combustion. Ms. Sci. Thesis. USA, Virginia Polytechnical Inst., 1998. P. 58.
- [22] *Gallimore S.D., Jacobsen L.S., O'Brien W.F.* // AIAA Paper, 2002. Vol. 5247. P. 2002.
- [23] *Словецкий Д.И.* Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. М.: Наука, 1980. 310 с.
- [24] *Антонов Г.Г., Бакит Ф.Г., Бородин В.С.* и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 6. С. 1053.