УДК 533.6.011:533.9:537.52

О некоторых возможностях использования изображений в инфракрасном диапазоне длин волн для исследования процессов в дуговом разряде

В.О. Герман, А.П. Глинов, А.П. Головин, П.В. Козлов, Г.А. Любимов

Сопоставление изображений воздушной электрической дуги, полученных с помощью высокоскоростной регистрации в разных диапазонах длин волн, а именно, от видимого 0,4–08 мкм до инфракрасного 0,9–5,0 мкм, в совокупности с анализом осциллограмм тока и напряжения позволяет уточнить изображение ее структуры, в обычных условиях подвергнутое «засветке» излучением плазмы. Показаны возможности применения регистраторов изображений в ИК-диапазоне длин волн и для анализа процессов непосредственно на графитовых электродах и для оценки параметров столба дуги.

PACS: 52.80.Mg

Ключевые слова: электрическая дуга, скоростная регистрация изображений, видео — и инфракрасные диапазоны длин волн, электроды, мониторинг.

Введение

В последнее время появилась возможность исследования разряда с помощью цифровой регистрирующей техники не только в области видимого диапазона световых волн, но и в ИК-диапазоне [1]. Полученные ранее изображения разряда с помощью фото-, кино- и скоростной видеосъемки, несомненно, значительно расширили представления о его структуре [2, 3].

Однако проблема заключалась в том, что сам разряд, особенно при значительных токах, излучает мощный световой поток. Поэтому регистрация изображения разряда была возможна только в условиях почти полностью закрытой диафрагмы и при ослаблении светового потока плотными нейтральными фильтрами [4–7].

В последнее время с целью упрощения самого эксперимента и сопоставления с результатами других авторов были отобраны электроды из графита марок ПГ и ЗОПГ. Графит ПГ, как показали микроструктурные исследования, имеет микропримеси, в частности, кальция и магния до десятых долей весового процента. Более чистым и плотным оказался графит ЗОПГ. Его микро-

Статья поступила в редакцию 10 июля 2013 г.

примеси (кремний, железо, алюминий, магний, бор, медь, марганец и др.) каждый в отдельности составляют не более $10^{-4}-10^{-5}$ весового процента, а все примеси в сумме не превышают 0,02 %. Электроды из обоих марок графита имеют т. н. открытую пористость. Такие электроды в процессе эксплуатации выделяют накопленный межпоровым пространством газ и поглощают его из окружающей среды после завершения разряда.

Поскольку графиты, в силу своей природы, даже в зоне опорных пятен ($T \approx 3000$ K) не дают жидкой фазы, то, по-видимому, перемещение этих пятен как-то связано с пылегазовыми струями (потоками), исходящими из электрода. На некоторых кадрах как видео-, так и тепловизионной съемки это просматривается [1].

Следует в качестве примера отметить, что обработка изображений в ИК-диапазонах спектра широко применяется, например, при дистанционном зондировании земной поверхности из космоса с целью глобального экологического мониторинга [8]. В частности, ближний ИК-диапазон (0,76–0,9 мкм) используется для контроля распределения биомассы у морских побережий. Средний ИК-диапазон (1,55–1,75 мкм) дает возможность оценивать содержание влаги в почве и растительности. Другой средний ИК-диапазон применяются при поиске полезных ископаемых [8].

Сами высокоскоростные ИК-регистраторы изображений (с учетом экспериментально-расчетной калибровки и сопутствующего регистратору программного обеспечения) обычно существенно дороже соответствующих по скорости и качеству съемки видеокамер. Поэтому важно оценить принципиальные возможности их применения

Герман Валентин Остапович, вед. научн. сотрудник. Глинов Александр Петрович, вед. научн. сотрудник. Головин Александр Петрович, ст. научн. сотрудник. Козлов Павел Владимирович, научн. сотрудник. Любимов Григорий Александрович, гл. научн. сотрудник. Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Россия, 119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, 1. Тел.: 8 (495) 939–15–28. E-mail: krestytroitsk@mail.ru

[©] Герман В.О., Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В., Любимов Г.А., 2013

для анализа и мониторинга процессов, в частности, в электрофизических и плазменных установках. Это может быть важно особенно при анализе стабильности формы столба дуги, используемого, например, как плазменный поршень, якорь или резец.

Главная цель настоящей работы – выявить принципиальную возможность применения ИКрегистраторов изображений для анализа оптических, тепловых и электрофизических процессов непосредственно в электродах и твердых частицах в межэлектродном (для определенности воздушном при атмосферном давлении) промежутке.

Такой подход позволит уточнять структуры газоплазменных и газопылевых потоков, связанных с разрядом, «засвечиваемой» излучением дуговой плазмы при обычной регистрации изображений в видимом диапазоне длин волн, а с учетом осциллограмм тока и напряжения даст возможность оценивать распределение вдоль оси токового канала эффективной (т.е. средней по поперечному сечению столба) электропроводности.

Постановка задачи

Детальная постановка задачи по проведению экспериментов и схема измерений подробно изложены в [1]. Поэтому отметим только ее ключевые моменты и особенности исследований данной работы.

Обычно при исследовании газо- и электродинамических быстропротекающих, сугубо нестационарных процессов используется их фото- или видео регистрация с записью на осциллограф зависимостей разрядного тока и напряжения от времени. Это позволяет не только получить картину процесса в целом, но и сравнить между собой отдельные, разнесенные во времени, его участки, проанализировать эти участки картины разряда совместно с другими параметрами, которые синхронно фиксируются в эксперименте [1].

Такой подход становится актуальным при значительных выделениях энергии (1–50 кВт) в разрядном промежутке. В частности, это возможно при больших токовых нагрузках (0,1–2 кА) и межэлектродных расстояниях (30–70 мм). Такой энергии вполне достаточно для диссоциации газа, возбуждения его электронных атомарных и колебательных молекулярных состояний и ионизации. Следствием этого является мощное, причем сугубо неравномерное по его объему излучение различных зон промежутка, для регистрации картины которого необходимо применение обычных мер ограничения светового потока. К числу этих мер относятся: работа с почти закрытыми диафрагмами, постановка нейтральных светофильтров и малая длительность экспозиции. Однако при этом необходим некий компромисс, поскольку для получения более полной картины разряда следует просматривать все зоны нестационарно излучающего объекта межэлектродного промежутка, а светофильтры могут «отсечь» значительную часть изображения.

В настоящей работе основной акцент сделан на уточнении и дополнении анализа экспериментального исследования протяженного электрического дугового разряда, ориентированного преимущественно вертикально (анод внизу), с квазистационарными токами до 300 А в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах [1-3] с помощью регистрации и обработки ИК-изображений (0,9-5,0 мкм). Диаметр стержневых графитовых электродов - 16 мм, длина разрядного промежутка l_{M2} – от 3 до 5 см. Инициация разряда осуществлялась смыканием электродов с последующим их раздвижением до выбранного межэлектродного промежутка $l_{\rm MR}$ за время 0,1-0,2 с. Продолжительность пусков составляла 2-3 с.

Частоты регистрации изображений и выдержки на приводимых кадрах видеосъемки и ИК- диагностики следующие: 1200 к/с, 25 мкс и 500 к/с, 10 мкс, соответственно. При работе над статьей принимались во внимание также результаты съемок как на более, так и менее скоростных видеои ИК-регистраторах. Для тепловизоров использовалась внутренняя калибровка, исходя из набора базовых моделей сопутствующего программного обеспечения.

Анализ тепловых и оптических неоднородностей

Структура разряда, определяемая на основе обработки изображений, полученных разными методами их регистрации, может отличаться. В настоящей работе проведено сопоставление изображений дугового разряда, полученного при разных спектральных длинах волн, а именно, от видимого до инфракрасного диапазона (0,4–5 мкм). Для уточнения динамики и формы ствола дуги принимались во внимание осциллограммы тока и напряжения.

Известно, что спектральные характеристики излучения, в частности, сварочных дуг (кривые 2–4, рис. 1, a) и особенно дугового столба (кривая 2, рис. 1, a) качественно похожи на характеристики излучения Солнца (кривая 1, рис. 1, a) [9]. Расчеты, проведенные в настоящей работе по модели Планка равновесного изотропного излучения разрядной среды в диапазоне температур T от 3 до 9 кК, приведены на рис. 1, a (кривые 5–7). Видно, что уже при T = 6 кК, что соответствует минимальной температуре, при которой начинаются интенсивные процессы ионизации воздушной среды атмосферного давления [3] и возникает электропроводность, достаточная для поддержания дугового разряда), пик интенсивности изучения в указанном температурном диапазоне смещается с ростом температуры от среднего ИК- к видимому диапазону длин волн λ .

Линейный динамический диапазон использования цифровых видеокамер, работающих в зоне 0,4–0,8 мкм видимого света, позволяет на типичном зарегистрированном изображении разряда (рис. 1, δ) выделить, в частности, зоны равной степени «серости», а, следовательно, и светимости. Такая степень детализации видеоизображения была бы невозможна при использовании аналоговой фоторегистрирующей аппаратуры с носителем информации в виде пленки.

Несколько иная картина разряда может быть зарегистрирована в инфракрасном диапазоне длин волн светимости (рис. 1, *в*), где обрезана «засветка», вызванная энерговкладом в газовые компоненты в видимом диапазоне длин волн межэлектродного промежутка. Этот кадр зарегистрирован аппаратурой в инфракрасном диапазоне длин волн (3,9–4,01 мкм). На нем просматривается анодная



Рис. 1. Относительная интенсивность излучения $I_{\lambda}(a)$ и сопоставление изображений разряда, полученных в разных диапазонах длин волн λ (б, в): 1–4 — излучение Солнца, столба сварочной дуги, общее при сварке и с электродов [9]; 5–7 — расчетное равновесное излучение по Планку при температуре среды T = 3, 6, 9 кK; l = 0,4-0,8 (б), 2–5 мкм (в); межэлектродное расстояние $l_{is} = 50$ мм; ток 100–120 А.

струя, а в ней мелкомасштабные структуры, визуально похожие на частицы материала электрода. Это может быть обусловлено недостаточной разрешающей способностью аппаратуры, приводящей к дробовому шуму регистратора из-за воздействия электромагнитного поля разряда. Эти структуры, вообще говоря, не соответствуют микрочастицам, принесенным с анода струями, возникающими на его поверхности или внутри его микропор. Наличие же графитовых частиц в воздушных дугах на угольных электродах – факт известный. В частности, при рассматриваемых токах удельная эрозия электродов g может доходить до ~ 10 мкг/Кл [10], а в спектре излучения таких дуг доминируют линии С и полосы СN [6, 10].

Видно (см. рис. 1, б и в), что «яркостной» диаметр столба дуги, определяемый по поперечному размеру области максимальной яркости изображения, существенно больше (в 1,5–2 раза и более) на видеоизображении.

Следует отметить, что сопоставляемые на рис. 1 кадры изображений получены при примерно идентичных условиях (токи, межэлектродные расстояния, время или форма разряда) и в одном эксперименте. Сопоставление видео и ИК-изображений разряда (при примерно идентичных условиях) в случае меньших ИК-длин волн (0,9–1,1 мкм) показывает, что ствол дуги на видеоизображении хотя и остается шире (примерно, в 1,5 раза), но приближается по ширине к стволу разряда на ИК-изображении.

Сравнение кадров ИК-изображений дуги при разных длинах волн λ от 0,9 до 5 мкм показало, что обычно с ростом λ размеры светящихся областей уменьшаются. Но бывает и наоборот. Это обусловлено немонотонной зависимостью распределения Планка от длины волны. Как следствие, пик интенсивности излучения в рассматриваемом температурном диапазоне смещается с ростом температуры от среднего ИК- к видимому диапазону длин волн λ (см. рис. 1, *a*).

В результате, при умеренных температурах (примерно, 500–1000 °С и ниже) тепловизор (0,9– 5 мкм) «видит» объект лучше, чем видеокамера (0,4–0,8 мкм). Однако при более высоких температурах (например, 6–10 кК) пик интенсивности смещается в область более коротких волн и лучше «видит» уже видеокамера.

Тепловое поле разрядной области может быть получено в виде набора профилей температуры по различным продольным и поперечным сечениям. Кадр разряда (рис. 2, *a*) с сечениями (линии 1–7) и соответствующие вдоль них распределения температуры на поверхности анода и в прианодной области приблизительно характеризуют тепловое поле в рассматриваемой зоне. Заметим, что прибор был тарирован в условиях стационарной плазмы. Верхний предел температур при тарировке близок к нашим предполагаемым температурам, а плазма квазистационарна. Степень же «серости» є при излучении графитовых поверхностей слабо зависит от температуры и составляет величину порядка 0,8 [12, 13]. При изменении температуры *T* окружающей электроды воздушной среды от 2 до 6 кК величина є изменяется примерно в 3 раза [13]. Тогда ошибка измерения *T* составит величину ~ 30 % (т. к. $T \sim \varepsilon^{-1/4}$).

Возвращаясь к обсуждению рис. 2, отметим, что тепловое поле (при наличии тока) сильно неоднородно, а профили температуры могут иметь несколько пиков. По-видимому, это связано с неравномерным и нестационарным нагревом анода в процессе перемещения опорного анодного пятна.

В режиме остывающего после отключения тока анода соответствующие тепловые поля становятся более однородными. Сравнение их видеои термоизображений представлено на рис. 3, а. Двухмерная картина относительных полей температуры (рис. 3, б), полученная с помощью программных средств ИК-регистратора изображения, наглядно характеризует неоднородности структуры дуги и позволяет рассчитать эффективные диаметры ствола дуги d_{агс} (рис. 3, *в*). Они определяются как ширины соответствующих профилей температуры или интенсивности излучения, отвечающих половине их амплитуды. Видно, что диаметр дугового ствола, найденный по температурному профилю (кривая 1), примерно на 0,5 мм больше диаметра, рассчитанного по яркости изображения (кривая 2). Для сравнения с данными других авторов приведен результат из монографии [2] (точка 3).

Получение данных о распределении ширины ствола дуги в межэлектродном промежутке важно для оценки средней по поперечному сечению

ствола электропроводности. Естественно, это возможно только при наличии данных о длине дугового столба и падении напряжения на нем. Реально же (при нестационарной нестабильной дуге) длина дугового шнура $l_{\rm arc}$ может многократно превосходить межэлектродное расстояние $l_{\rm is}$ [1, 11]. Длина искривленного токового шнура, в принципе, может быть получена из анализа ортогональных проекций изображений разряда, полученных с помощью синхронной регистрации изображений в специально установленных зеркалах [14].

Тогда, после определения величин $l_{\rm are}$, $d_{\rm are}$, I (t), U (t) и приэлектродных падений напряжения $U_{\rm e}$, аналитическая процедура расчета электропроводности такова:

$$E = \frac{U - U_e}{l_{arc}},\tag{1}$$

$$j = \frac{4I}{\pi \delta_{arc}^2},\tag{2}$$

где *E*, *j* – продольные составляющие по оси (в общем случае искривленного) дугового столба напряженности электрического поля и плотности тока.

Из закона Ома с учетом (1) и (2) находим усредненную по поперечному сечению ствола дуги электропроводность токового канала:

$$\sigma = \frac{j}{E}, \qquad (3)$$

Величины I (t), U (t) и U_e находятся из осциллограмм. При этом полное падение напряжения на дуге (с учетом приэлектродных падений U_e) рассматривается на всем межэлектродном промежутке, а величина U_e может быть оценена из осциллограмм разряда в узком (порядка 1 мм) межэлектродном промежутке.

Когда дуга стабильна (т.е. существенно не искривлена и $l_{\rm arc} \approx l_{\rm is}$), расчет электропроводности по схеме (1) – (3) не потребует усложнения схемы проведения экспериментов с целью опре-



Рис. 2. Линии диагностики (1–10) в аноде и его окрестности (а) и соответствующие им температурные профили (б): x, y — горизонтальная и вертикальная координаты (5,5 пкс (пикселей) = 1 мм); l_{is} = 50 мм, ток 250 A; стационарный разряд; длительность пусков 2,6–2,8 с; вертикальный разряд; графитовые электроды.

деления $l_{\rm arc}$ (например, регистрация трех проекций разряда с помощью специально установленных зеркал).

Мониторинг состояния граничной поверхности анодного узла

Контроль работоспособности электродов с открытой пористостью в электродуговых установках может быть важен, например, с целью замены изношенных узлов, а также для отслеживания нежелательных процессов выброса газопылевых струй («плюмов») из зон локального перегрева [1], усиление интенсивности которых может служить сигналом о начале разрушения электрода. Отметим, что выброс таких струй с металлических электродов, не обладающих открытой пористостью, нами не наблюдался.

На рис. 4, *а* показаны соответственно видеои ИК-изображения разрядной поверхности анода, примерно, через 2,7 мс после отключения тока. Над контуром полусферической поверхности электрода просматривается светящаяся плазма (1). Зона высокой яркости анода (2) уже расползлась практически на всю его полусферическую поверхность. На скорость процесса остывания оказывает воздействие сильно разогретая его разрядная поверхность. Из-за сильного нагрева электрода (затронувшего весь его массив) скорость остывания на его поверхности может быть замедлена, так как идет подпитка теплом из глубинных нагретых областей. Дополнительно не исключается ситуация наличия тепловыделения при протекающих химических реакциях, например, горения графита. Теплообмен на аноде имеет нестационарный характер, а тепловое поле на нем неоднородно из-за нестационарности самих разрядных процессов, связанных как с изменением тока, так и с перемещением опорных дуговых пятен.

Отметим, что эта картина существенно отличается от ситуации на катоде, где тело катода прогревается на меньшую величину и в меньшем объеме и уже через 750 мс после отключения тока не видно его раскаленной поверхности.

Тепловое поле в остывающем аноде детально характеризуют профили температуры вдоль и поперек электрода в плоскости наблюдения через 0,1 мс после отключения тока. Это позволяет проследить режимы теплообмена нагретой зоны электрода с окружающим пространством и его относительно холодной внутренней, далекой от контакта, областью. Остывание анода проходит в две фазы. Первая фаза длится порядка 100 мс. В ней температура на анодном куполе квазиоднородна, что может означать остывание поверхности анода за счет теплопередачи в его внутреннюю зону (прогрев тела анода) либо нормально контактной поверхности. Вторая фаза остывания следует за первой и сопровождается движением и деформацией изотерм уже на цилиндрической части анода.

На рис. 4, б представлена зависимость максимальной температуры торцевой поверхности анода от времени. Эта зависимость наблюдается



Рис. 3. Сопоставление оптических и температурных неоднородностей дуги по ИК-изображениям: а — термоизображение; б — распределения относительных температур и интенсивностей излучения; в – зависимости ширины δ_a профилей температуры (1) и интенсивности излучения (2) от координаты у, соответствующих половине их высоты; λ = 2–5 мкм; l_{is} = 50 мм; ток 250 A; 3 — данные [2] при 200 A; d — диаметр цилиндрической части электрода; δ — расстояние от катода до верхней границы кадра; T_m — пик температуры.



Рис. 4. Видеоизображение твердой поверхности анода и прилегающего плазменного слоя (а) и зависимость максимальной температуры остывающего анода в моменты времени t после отключения тока (по данным ИК- съемки при $\lambda = 2-5$ мкм с диагностикой температуры в диапазоне $\lambda = 3,97-4,01$ мкм) (б): 1 — газопылевая теплоизолирующая пелена над разогретой поверхностью анода (2); параметры разряда те же, что на рис. 2.

без каких-либо особенностей (изломов и скачков), что соответствует отсутствию резких смен режимов теплообмена. Однако в определенный момент времени (порядка 0,1 с после отключения тока) в некоторых пусках над торцевой поверхностью анода было обнаружено небольшое газопылевое облако (например, область 1 на рис. 4, a). Оно могло образоваться либо вследствие испарения локально горячей поверхности 2, либо вследствие выброса газопылевой среды из внутренних полостей электрода. Подобные, но только более массивные «облака», в принципе, могли бы изменить характер конвективных течений и теплообмена вокруг рассматриваемого электрода.

Отметим, что ИК-диагностика изображений (по сравнению с видеорегистрацией) может давать более подробную картину структуры не толь-



Рис. 5. Сравнение синхронизованных видео- (а) и термо- (б) изображений: 1, 2, 4 — катодный, анодный и дуговой шнуры; 3 — диффузная область разряда; 5, 6 — зоны локального нагрева анода; ток 120 А; вертикальный разряд; анод снизу; $I_{is} = 50$ мм.

ко межэлектродной плазмы, но и теплового поля самих электродов. Так на рис. 5, a на видеокадре видна зона локального нагрева (5) анода. На ИКизображении (рис. 5, δ) эта область также видна, но дополнительно наблюдается и другая перегретая зона анода (δ), невидимая на кадре рис. 5, a. Кроме того, ИК-диагностика изображений остывающих электродов позволяет анализировать их режимы теплообмена. При неизвестных или неполных теплофизических данных по материалам электродов такие измерения при сопутствующих расчетах тепловых задач дадут возможность недостающие характеристики материалов восполнять.

Наконец, ИК-диагностика (на основе сопутствующего программного обеспечения, позволяющего рассматривать объект с «подсветкой») позволяет, в принципе, контролировать изменение рельефа поверхности электродов, например, отслеживать заблаговременно появление микропор и трещин.

Теоретические оценки тепловых процессов на аноде

Активную поверхность анода моделируем полусферой радиуса $R \approx 8$ мм. Ее площадь $S = 2\pi R^2 \approx$ $\approx 400 \text{ мм}^2$. Ток I = 250 А; падение напряжения на разряде U = 100 В, в прианодной зоне величина $U_a = 10-20$ В. Согласно рис. 4, *б*, примем температуру поверхности в момент начала остывания T = 3000 K. Коэффициент теплового излучения графитовой поверхности (степень «серости») $\varepsilon = 0,8$. Удельные коэффициент эрозии электрода и теплота испарения его материала $\gamma = 10^5$ г/Кл, r = 50 МДж/кг.

Тогда мощность P, вкладываемая в разряд, джоулево тепловыделение в прианодной зоне P_a и мощность теплового излучения с поверхности анода в окружающее пространство P_r определяются по следующим соотношениям:

$$P = IU = 25$$
 кВт; $P_a = IU_a = 2,5-5$ кВт;

$$P_{\rm r} = \varepsilon \sigma_{\rm B} T^4 S \approx 1.5 \text{ kBr},$$

где $\sigma_{\rm B}$ – постоянная Стефана-Больцмана.

При испарении анода и охлаждении его потоками окружающей среды могут быть затрачены соответствующие мощности P_{vap} и P_{cool} , а именно:

$$P_{_{\mathrm{vap}}} = \gamma Ir = 0,125$$
 кВт; $P_{_{\mathrm{cool}}} \approx \alpha TS \approx 0,06$ кВт,

где $\alpha = 5,6 + 4v - коэффициент теплоотдачи глад$ кой твердой поверхности, обдуваемой воздушным потоком со скоростью v [12]. В наших экспериментах (по оценкам скоростей перемещениямикрочастиц при высокоскоростной видеосъемке, вплоть до частоты кадров 6·10⁴ к/с) величина $v \sim 10$ м/с, и тогда $\alpha \approx 45,6$ Вт/м²К.

Мощность теплоотвода вглубь электрода P_q можно определить следующим образом:

$$P_q \approx \lambda \frac{T}{\rho} S \approx 0.3 \text{ KBT},$$

где коэффициент теплопроводности материала электрода $\lambda \approx L \sigma T/r \approx 21$ Вт/мК оценивался по закону Видемана-Франца с учетом проведенных измерений его удельного электрического сопротивления (вдоль оси стержня) $\rho \approx 3,5 \, 10^{-6}$ Ом·м и числа Лоренца $L = 2,45 \cdot 10^{-8}$ Вт Ом/К².

Видно, что основные процессы, определяющие остывание анода, – излучение и теплопроводность. При температуре T = 3000 К отношение мощностей $\delta_p = P_r / P_q = 5$. С уменьшением температуры $\delta_p \sim T^3$. В результате величина $\delta_p = 1$ при уменьшении T в 5^{1/3} \approx 1,7 раз, т.е., примерно, при 1700 К. При меньших температурах будет доминировать уже теплопроводность.

Заключение

Показаны принципиальные возможности применения регистраторов изображений в инфракрасном диапазоне длин волн как для визуализации процессов непосредственно в электродах и твердых частицах в межэлектродном промежутке, так и для уточнения структуры газоплазменных и газопылевых потоков, связанных с разрядом, «засвечиваемой» при обычной регистрации в видимом диапазоне длин волн излучением дуговой плазмы.

Приведены примеры возникновения ИКизображений электродов для своевременного выявления на них зон локального нагрева, не контролируемых традиционной видеосъемкой. Обсуждаются возможности диагностики теплового поля и уточнения теплофизических характеристик материала электрода.

Предложен метод определения диаметра дугового ствола стабилизированного разряда на всем промежутке между катодом и анодом на основе цифровой обработки его изображений и осциллограмм тока и напряжения. Это позволяет находить распределение средней по поперечному сечению токового шнура электропроводности вдоль оси разряда.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИПМех РАН: А.Ф. Колесникову — за предоставленное для проведения эксперимента тепловизионное оборудование и А.Н. Гордееву за участие в эксперименте и за консультации по использованию прикладных программ, сотруднице химфака МГУ Е.Д. Киреевой — за расшифровку структурного и химического состава об-

В.О. Герман, А.П. Глинов, А.П. Головин и др.

разцов графитовых электродов, М.А. Мищуку (ОАО «Пергам-Инжиниринг») — за консультации и техническое содействие в проведении экспериментов.

Частично работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 13–01–00305-а).

Литература

1. Герман В.О., Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В., Любимов Г.А. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 108.

2. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961.

3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.

4. Герман О.В., Глинов А.П., Козлов П.В., Любимов Г.А. //Изв. РАН. МЖГ. 2011. № 6. С. 136.

5. Герман О.В., Ершов А.П., Козлов П.В., Любимов Г.А., Сурконт О.С. // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 1. С. 142.

6. Герман О.В., Глинов А.П., Козлов П.В., Любимов Г.А. // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 2. С. 185.

7. Герман О.В., Ершов А.П., Козлов П.В., Копыл П.В., Любимов Г.А., Сурконт О.С. // Теплофизика высоких температур.. 2009. Т. 47. № 4. С. 506.

8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005.

9. Попатьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом.— Киев: Экотехнология, 2007.

10. Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. Термоэмсиссионные дуговые катоды — М.: Энергоатомиздат, 1988.

11. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. — Л.: Энергия, 1975.

12. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982.

13. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Физические величины. Справочник // — М.: Энергоатомиздат, 1991.

14. *Копыл П.В.* // Труды X конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ. 2009. С. 195.

Some using possibilities of images recording in IR range for study of electric arc processes

V.O. German, A.P. Glinov, A.P. Golovin, P.V. Kozlov, and G.A. Lyubimov

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University 1 Michurinskiy av., Moscow, 119192, Russia E-mail: krestytroitsk@mail.ru

Comparison of the air electric arc images gained by means of high-speed recording in different gamut's of waves lengths, from visible (0,4-0,8) to infrared (0,9-5,0 microns) is spent. It, in aggregate with the analysis of oscillograms of a current and a voltage, has allowed improving the image of its interior structure, in usual requirements subjected to «flare» plasma radiation. Possibilities of application of images registrars in IR gamut of wave lengths and for the analysis of processes immediately on graphite electrodes and for arc column data estimation are shown.

PACS: 52.80.Mg *Keywords:* electrical arc, speed shooting, video- and infrared gamuts of wave lengths, electrodes, monitoring..

Bibliography — 14 references

Received July 10, 2013