

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ УСТРОЙСТВ

М.Ю. Докукин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, dmv252@bmstu.ru

Развитие современной науки и техники настоятельно требует разработки и совершенствования плазменно-дугового оборудования для технологических процессов сварки, плавки, термообработки химически активных и тугоплавких материалов (например, молибден, титан, цирконий, и их сплавы).

Эффективность и качество указанных нагревных технологий определяются, прежде всего, эффективностью соответствующих источников нагрева. В связи с этим большой практический интерес представляет разработка и исследование электродуговых устройств, способных работать как в условиях вакуума, так и при атмосферном и избыточном давлениях контролируемой среды. Именно вопросам комплексного экспериментального исследования теплонапряженных состояний электродных узлов посвящена данная статья.

Исследования электродуговых устройств на основе термокатодов (как «классического» полого, так и стержневого катодов [1]) предполагают определение параметров квазипрозрачной плазмы с концентрацией $n \sim 10^{20} \dots 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и температурой электронов $T_e \geq 10^4 \text{ К}$, измерение высоких рабочих температур катода ($T_k \sim 3000 \text{ К}$), определения больших тепловых потоков в анод ($Q_a \geq 1 \text{ кВт}$) и их распределения по рабочей поверхности. В связи с этим в состав экспериментальной установки входила различная диагностическая аппаратура, позволявшая определять как локальные, так и интегральные характеристики дугового разряда с термокатодом. В данной статье рассматривается методика и обсуждаются некоторые результаты диагностики тепловых состояний электродов.

Диагностические средства тепловых состояний электродов

Важнейшая характеристика работы катода - поле его температур - исследовалась с помощью многократного регистратора спектра МРС-1 (рис. 1).

Данный комплекс позволял получить на экране встроенного осциллографа за время развёртки $\sim 10^{-6}$ с полное температурное распределение вдоль поверхности катода. Это достигалось посредством специального прибора - диссектора, входившего в состав комплекса. Он представлял собой двойной электронно-оптический преобразователь (ДЭОП), т.е. совокупность ЭОП, непосредственно воспринимавшего оптическое изображение катода и преобразовывавшего его в электрические сигналы, и вторичного электронного умножителя, усиливавшего эти сигналы. В электронном преобразователе имелась специальная щель-диафрагма с системой управляющих электродов, на которые подавалось пилообразное отклоняющее напряжение для перемещения электронного изображения объекта поперёк щели. Таким образом, через щель проходил поток электронов, плотность которого соответствовала интенсивности отдельных участков оптического изображения. Усиленный в $10^5 \dots 10^6$ раз электронный сигнал снимался с коллекторной нагрузки умножителя и подавался через аттенюатор на вход осциллографа, встроенного в индикаторный блок МРС-1. При этом на экране наблюдалась осциллограмма распределения яркости объекта (катода) вдоль одной пространственной координаты (оси электрода). Дальнейшая обработка этой осциллограммы позволяла получить продольное распределение температур по поверхности катода. Разрешающая способность диссектора составляла 10 штрихов на 1 мм.

Комплекс также предоставлял возможность исследования динамики изменения температур катода во времени. Это достигалось путём подачи из блока управления ступенчато-нарастающего напряжения в генератор пилообразного напряжения электронно-лучевой трубки и в её усилитель, что позволяло осуществить сдвиг развёртки по горизонтали и вертикали. В результате на экране можно было наблюдать до 16 развёрток, каждая из которых соответствовала определённому моменту времени. Период повторения развёрток мог регулироваться в диапазоне от 1,5 до 300 мкс. МРС-1 имел задержку развёртки от 0,2 до 10000 мкс, а также возможности внешнего запуска

и выдачи инициирующего импульса на стороннюю аппаратуру (типа генератора импульсов, осциллографа и т.п.).

Средством определения локальных температур катода являлся оптический пирометр ЛОП-72, позволявший непосредственно измерять яркостную температуру объекта методом сравнения с яркостью свечения накаливаемой эталонной нити, встроенной в прибор. Диапазон измеряемых пирометром температур - 1170...6270 К, причём точность в интервале от 1170 до 3270 К составляла 10 К, а свыше 3270 и до 6270 К включительно - 50 К. Измерение температур свыше 1670 К осуществлялось путём применения специальных поглощающих фильтров. Для монохроматизации светового потока использовались красные фильтры, которые обеспечивали эффективную длину волны 650 ± 10 нм. С целью определения температуры в различных местах катода использовалась специальная металлическая решётка с системой поперечных щелевидных отверстий. Решётка располагалась непосредственно перед электродом и перекрывала его в продольном направлении. Т.к. минимальные размеры объекта, температура которого подлежала измерению, для данного пирометра были ограничены площадкой 1,5 x 1,5 мм, величина отверстий в решётке составляла 2 x 10 мм при шаге между щелями 2 мм.

Обычно данный пирометр использовался для регистрации температур ряда контрольных точек на поверхности электрода (срез, положение температурного максимума, область заделки), а также в качестве измерительного средства сравнения при анализе результатов, полученных с помощью диссектора.

Определение теплового потока, поступающего в анод, производилось средствами калориметрирования, которые включали в себя: ротаметр РМ-0,4ЖУЗ с регулирующим вентилем для установки и измерения расхода воды (до $100 \text{ см}^3/\text{с}$ с точностью $0,5 \text{ см}^3/\text{с}$) и ртутные лабораторные термометры (диапазон измерения 273... 328 К с точностью 0,1 К) на входе и выходе тракта охлаждения анода.

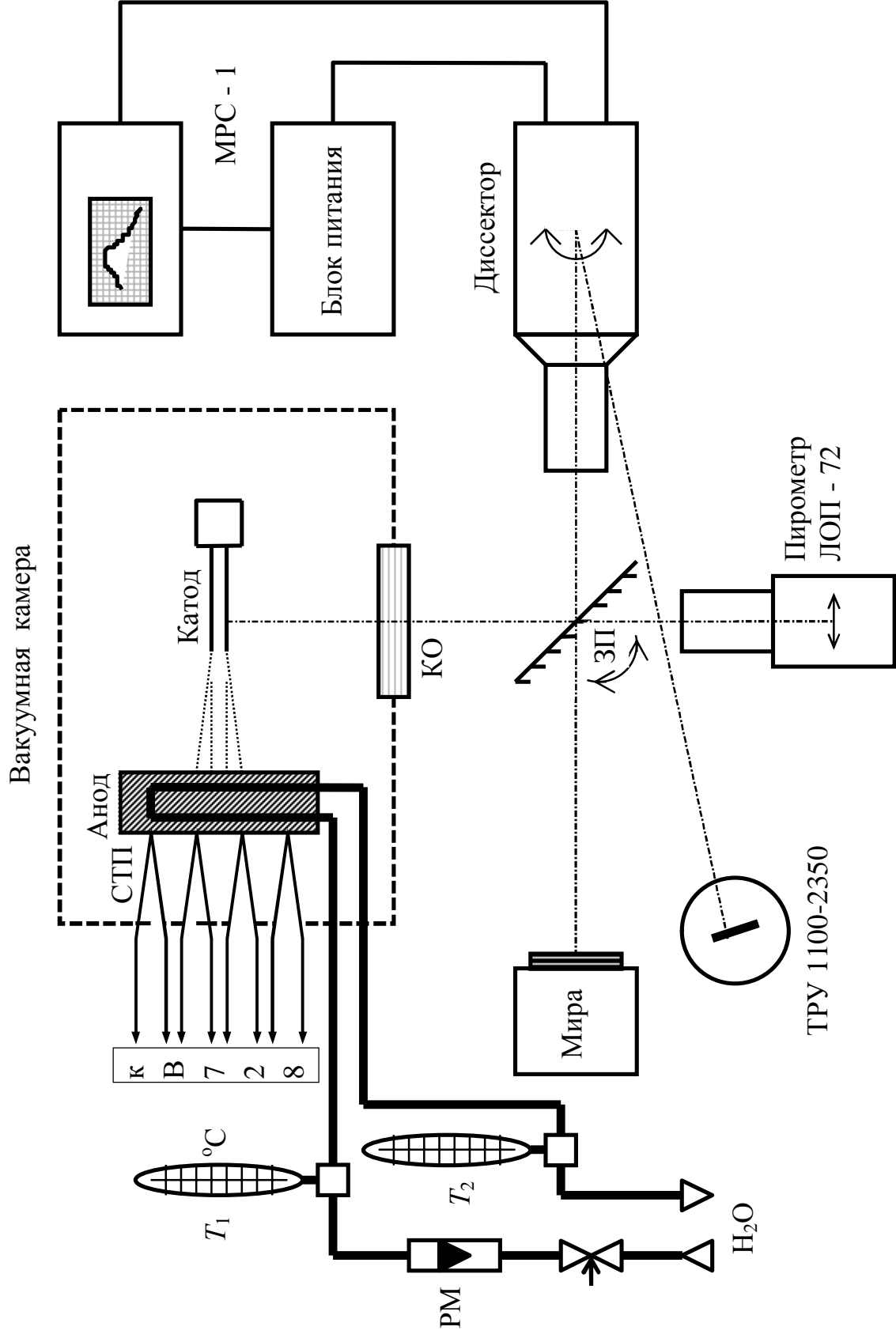


Рис. 1. Диагностические средства тепловых состояний катода и анода: КО – кварц оптический, ЗП – зеркало поворотное, СТП – система терморпар

Распределение температур на рабочей, обращенной к разряду, поверхности анода определялось (в относительных единицах) по показаниям хромель-копелиевых термопар. Система таких термопар располагалась в горизонтально-диаметральном направлении на тыльной стороне анода, представлявшего собой медный водоохлаждаемый диск $\varnothing 230$ мм толщиной 1,5 мм и расположенного перпендикулярно оси катода. Учитывая осесимметричность разряда и исходя из технических возможностей размещения термопар между витками «спирали» охлаждения анода, была выбрана определённая схема их установки (рис. 2). Термопары были зачеканены в поверхность анода, а их электровыводы через керамические изоляторы были выведены из зоны нагрева на соответствующий герморазъём монтажного фланца. Показания термопар регистрировались на цифровом вольтметре В7-28. Данная система позволяла измерять температуру в диапазоне 283...373 К с точностью 1 К.

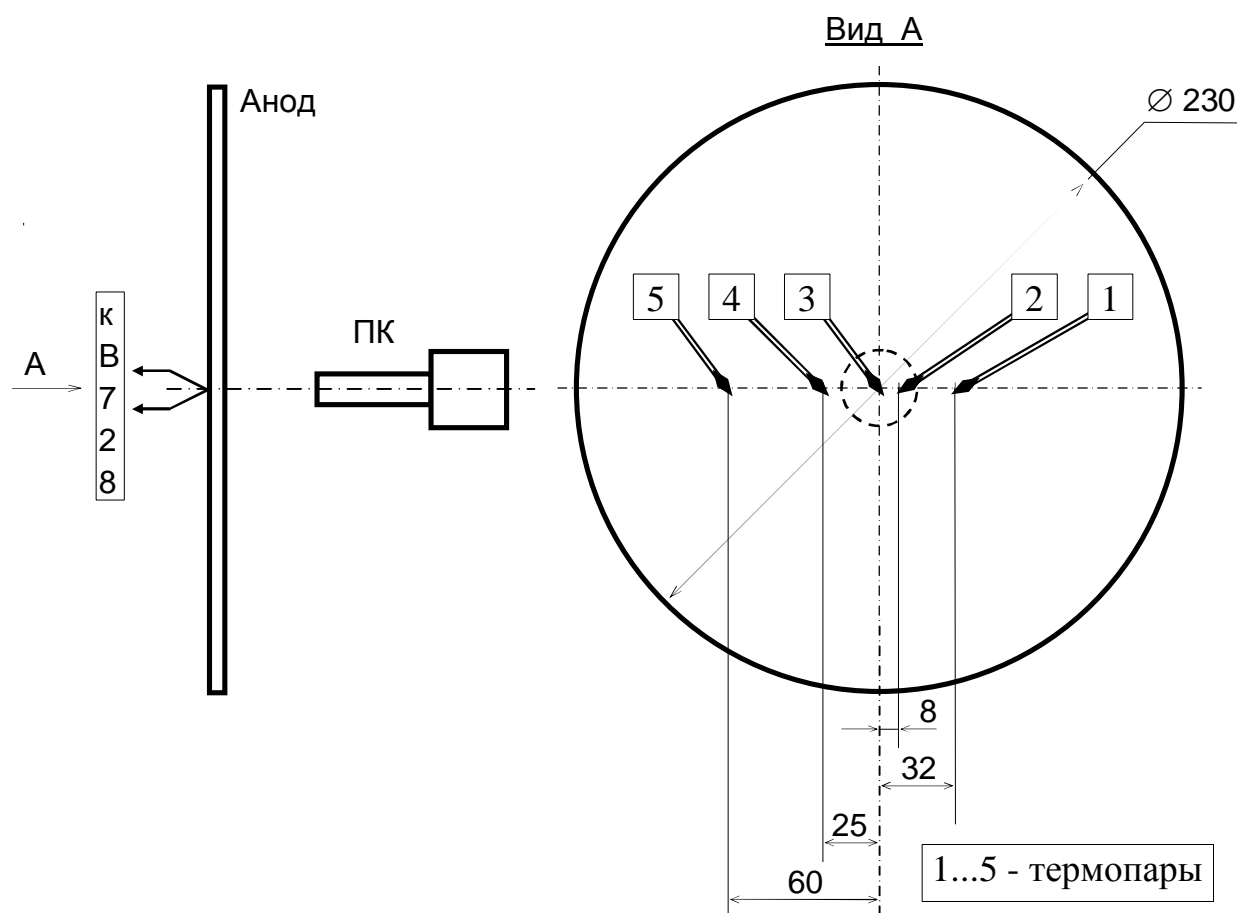


Рис. 2. Схема размещения термопар на аноде

Методы и результаты исследования тепловых состояний электродов

Измерения температурных полей полого катода проводились по методике, ранее отработанной авторами [2] на стержневых катодах. С помощью диссектора ЛИ-602, входившего в состав диагностического комплекса МРС-1, регистрировались мгновенные поля яркостных температур вдоль электрода $T_{я}(z)$ с последующим их пересчётом в истинные температуры.

Следует отметить, что диссектор предварительно настраивался на пространственное разрешение объекта по специальной штриховой мише (1 штр/мм) и дополнительно подстраивался на конкретный полый катод по виткам спирали его нагревателя. Тарировка получаемых температурных полей катода производилась по осциллограммам от эталонной температурной лампы ТРУ 1100-2350, откалиброванной в диапазоне $T_{я} = 1170...2570$ К. Съёмка катода и лампы производилась при постоянной оптической настройке диссектора с использованием красного светофильтра ($\lambda_{эф} = 650 \pm 10$ нм). На фотографиях (рис. 3) представлены характерные осциллограммы продольных распределений $T_{я}(z)$ на поверхности исследуемого электрода и температурной ленточной лампы.

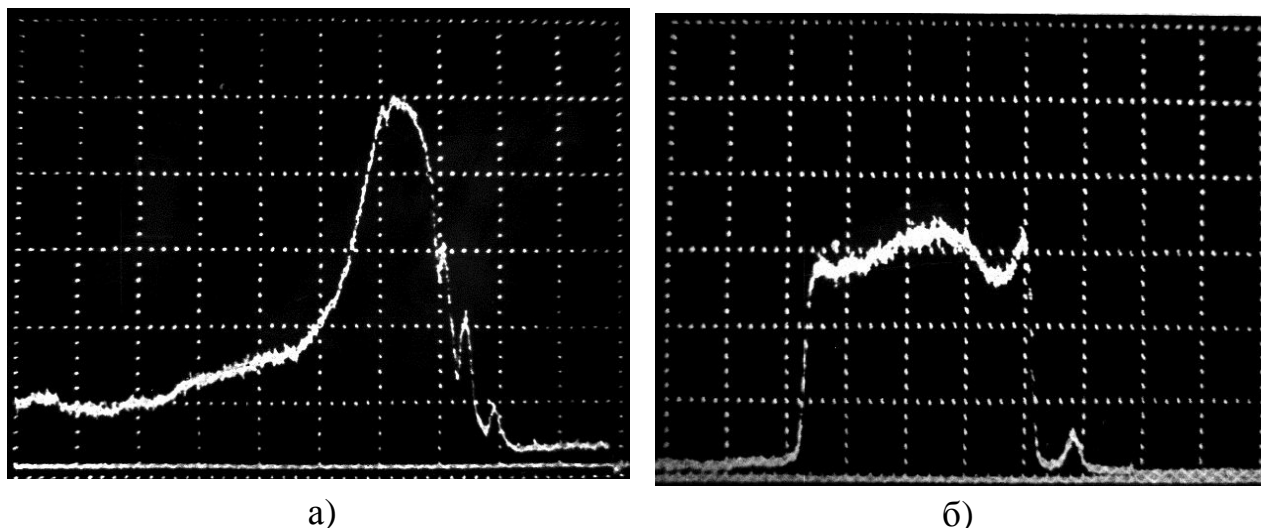


Рис. 3. Осциллограммы распределений яркостных температур $T_{я}(z)$ на поверхности: а) полого катода; б) ленточной температурной лампы

Дополнительно (в качестве тестирования результатов, полученных с помощью диссектора) проводилась контрольная пирометрия основных реперных точек полого катода (обычно это: срез катода - z_o , положение температурного максимума - z_{max} , место расположения электрического зонда или полюсов магнитной системы - z_3 , место заделки катода - z_k). Для этой цели использовался поверенный пирометр ЛОП-72, диапазон измеряемых температур которого с большим запасом перекрывал все возможные температурные поля катода.

Аналогичные температурные измерения проводились на модели со стержневым катодом.

Переход от измеренной яркостной температуры T_y к истинной T осуществлялся с учётом соответствующего значения монохроматической излучательной способности поверхности электрода $\varepsilon_{\lambda,T}$ [3, 4], зависящей от материала, эффективной длины волны и температуры. Для пересчёта использовалась формула из [4]:

$$1/T = 1/T_y - \lambda/c_2 \cdot \ln(1/\varepsilon_{\lambda,T}), \quad (1)$$

где $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К; $\lambda = 650$ нм = $6,5 \cdot 10^{-7}$ м.

В целом величина относительной погрешности измерения температуры катода δ_T определялась инструментальной погрешностью прибора (диссектора или пирометра) $\delta_{пр}$, погрешностью измерения тока накала эталонной лампы (если такая использовалась) $\delta_{нл}$, погрешностями, связанными с ослаблением принимаемого излучения смотровым (кварцевым) стеклом δ_τ и - с переходом от яркостных температур к истинным δ_ε . Согласно рекомендациям [4] получаем

$$\delta_T = \Delta T/T = \lambda/c_2 \cdot T \cdot (\delta_{пр} + \delta_{нл} + \delta_\tau + \delta_\varepsilon), \quad (2)$$

где $\delta_{пр} \leq 0,01$ (для используемых типов приборов); $\delta_{нл} \approx 0,02$ (погрешность измерения тока по падению напряжения на шунте); $\delta_\tau = \Delta\tau/\tau \approx 0,01$ ($\tau = 0,92$ - коэффициент пропускания кварца взят из [5]); $\delta_\varepsilon = \Delta\varepsilon_{\lambda,T}/\varepsilon_{\lambda,T} \approx 0,02$ ($0,383 \leq \varepsilon_{\lambda,T} \leq 0,481$ - для тантала при $T = 1000...3000$ К и $\lambda = 650$ нм). Таким образом для указанного диапазона температур получаем $\delta_T \leq 0,01$.

На рисунке 4 представлены характерные рабочие температурные профили стенки полого катода в зависимости от диаметра его полости.

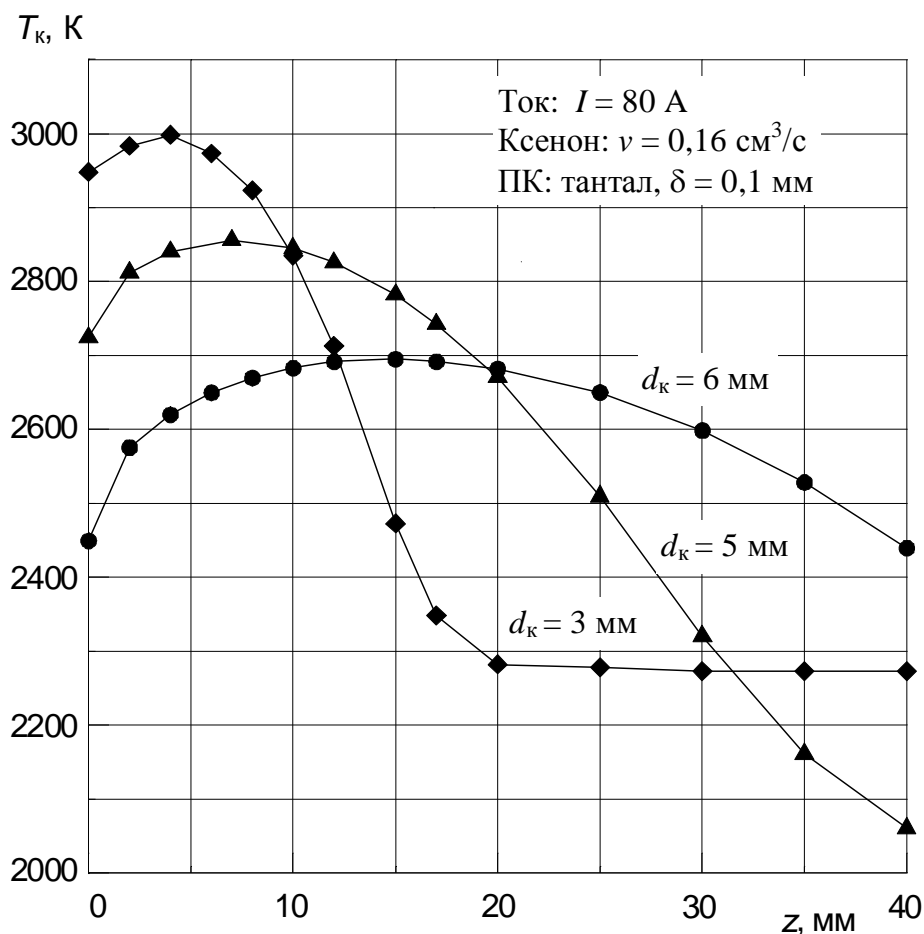


Рис. 4. Продольные распределения температуры на поверхности полого катода в зависимости от его диаметра d_k

Особенностью температурного распределения у полого катода является его немонотонность. В нормальном режиме работы катодная стенка имеет температурный максимум на некотором расстоянии от среза. Величина $T_{к \text{ max}}$ определяется током разряда и родом плазмообразующего газа, а его положение z_{max} зависит, прежде всего, от расхода и диаметра полости катода.

В экспериментах на модели со стержневым вольфрамовым катодом было установлено, что эффективность передачи энергии дуги аноду (тепловой к. п. д. процесса) зависит от давления в камере p и межэлектродного зазора $l_{\text{мэз}}$. В условиях низкого давления ($p \sim 10^3 \text{ Па}$) при малых зазорах ($l_{\text{мэз}} \leq 15 \text{ мм}$) наблюдается рост этого к. п. д. (об этом свидетельствуют результаты калориметрирования анода). Эти дуговые режимы также обеспечивают более

высокие удельные тепловые потоки в анод. Об этом косвенно говорят картины распределения температур на поверхности положительного электрода, полученные с помощью системы термопар (рис. 5). Причём использование рабочих сред с меньшим потенциалом ионизации (например, аргон) обеспечивает более концентрированный подвод энергии к аноду при более высоких абсолютных уровнях его температур.

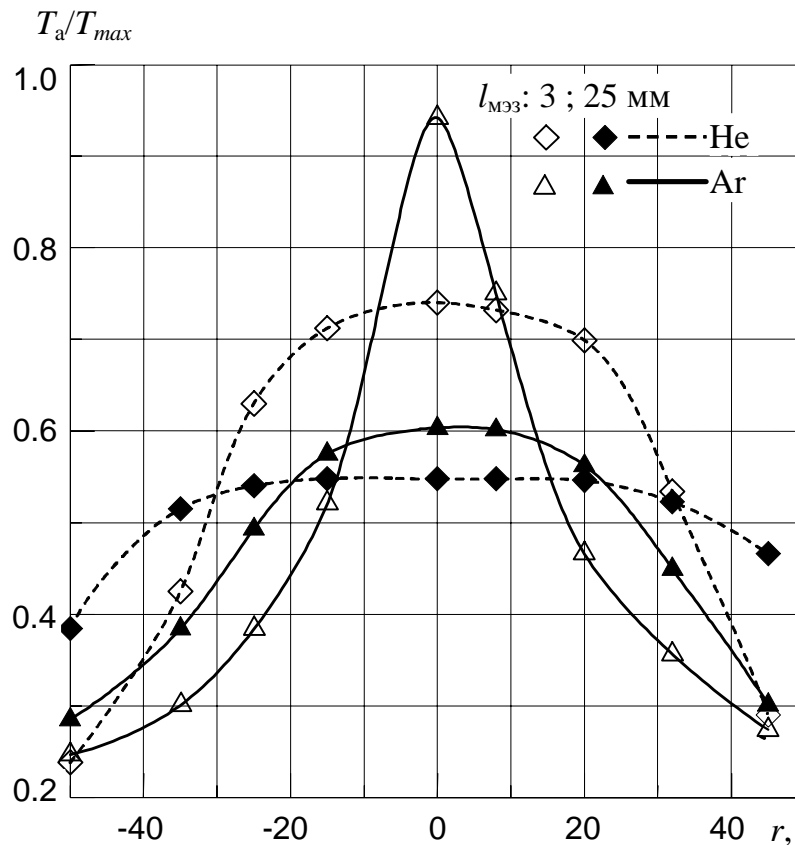


Рис. 5. Нормированные распределения температуры анода по его поверхности в зависимости от зазора ($l_{МЭЭ}$) и рабочего газа в условиях дуги низкого давления ($I=200$ А, $p = 2,66 \cdot 10^3$ Па)

Как уже отмечалось, интегральная тепловая нагрузка анода экспериментальной модели определялась методом калориметрирования. Устанавливался и измерялся ротаметром расход охлаждающей анод воды \dot{m} , соответствовавший заданному токовому режиму работы модели, измерялась температура воды на входе T_1 и выходе T_2 тракта охлаждения и по известной формуле рассчитывался интегральный тепловой поток в анод:

$$Q_A = c_p \cdot \dot{m} \cdot (T_2 - T_1), \quad (3)$$

где c_p - изобарная теплоёмкость воды (в расчётах принималась 4,18 кДж/кг·К).

Погрешность калориметрирования анода δ_Q определялась погрешностью ротаметра $\delta_{рм}$ и погрешностью термометров δ_t . В соответствии с рекомендациями [6] δ_Q вычислялась как

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_{рм}^2 + \delta_t^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + (\Delta T / T)^2}, \quad (4)$$

где $\Delta \dot{m} = 0,5$ г/с и $\dot{m} = 50$ г/с - точность и среднее значение рабочего диапазона ротаметра типа РМ-0,4Ж У3; $\Delta T = 0,1$ К и $T = 27,5$ К - точность и среднее значение рабочего диапазона применяемых ртутных термометров. Таким

$$\delta_Q = \sqrt{(0,5 / 50)^2 + (0,1 / 27,5)^2} \cong 0,01. \quad (5)$$

образом имеем

Эксперименты по воздействию малых поперечных магнитных полей на дуговой разряд с полым катодом выявили заметный рост характеристик внешней межэлектродной плазмы (T_e). Такая трансформация плазмы ведёт, как следствие, к росту общего энерговклада в анод (изделие), что и было зафиксировано в ходе его калориметрирования. Из рис. 6 видно, что тепловая мощность, воспринимаемая анодом, увеличивается приблизительно в 1,5 раза

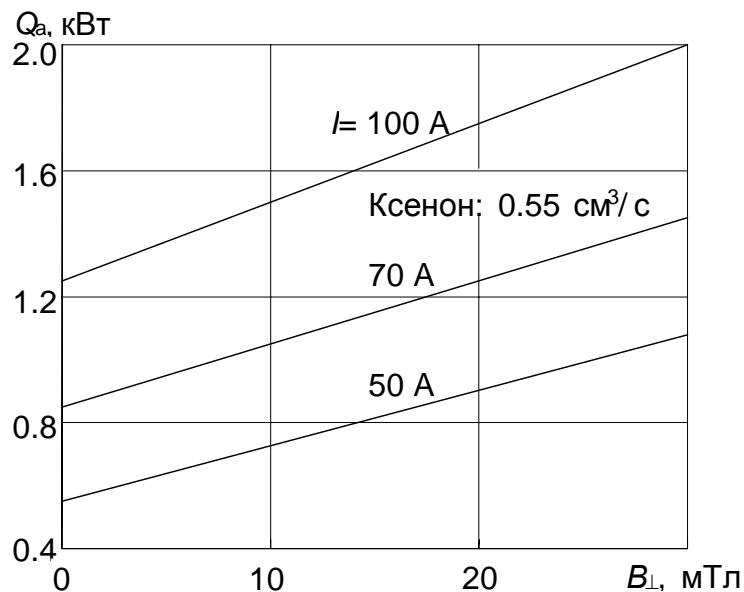


Рис. 6. Зависимость тепловой мощности, вкладываемой в анод, от поперечного магнитного поля

при воздействии полем B_{\perp} до 30 мТл в условиях режима стабилизации по току. В этих условиях возрастает напряжение дугового разряда, что обеспечивается дополнительной мощностью, поступающей от источника питания.

Таким образом проведенная на электродуговых моделях серия экспериментов показала правомерность и информативность использования комплексного подхода к диагностике теплонапряженных состояний электродных узлов, считающего методы и средства оптического измерения температуры, контактного калориметрирования тепловых потоков и определения температурных профилей на рабочих поверхностях с помощью термопар.

Список литературы

1. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / М.Ф. Жуков [и др.] Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. 158 с.
2. Исследование теплового режима электродов газоразрядных импульсных устройств / В.В. Гужков [и др.] // Промышленная теплотехника. 1979. Т. 1, № 2. С. 45-49.
3. Thermophysical properties of high temperature solid materials / In edition of Y.S. Touloukian. N. York - London, 1967. 1270 p.
4. Гордов А.Н. Основы пирометрии. М.: Metallurgy, 1971. 373 с.
5. Физико-технические свойства кварцевых стёкол для оболочек источников высокоинтенсивного света / Ю.П. Андреев [и др.] // Обзоры по электронной технике. Сер. 4 (М.). 1976, № 6. 75 с.
6. Кондрашов А. П., Шестопапов Е. В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерения. М.: Атомиздат, 1977. 200 с.