

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ СТЕКЛА

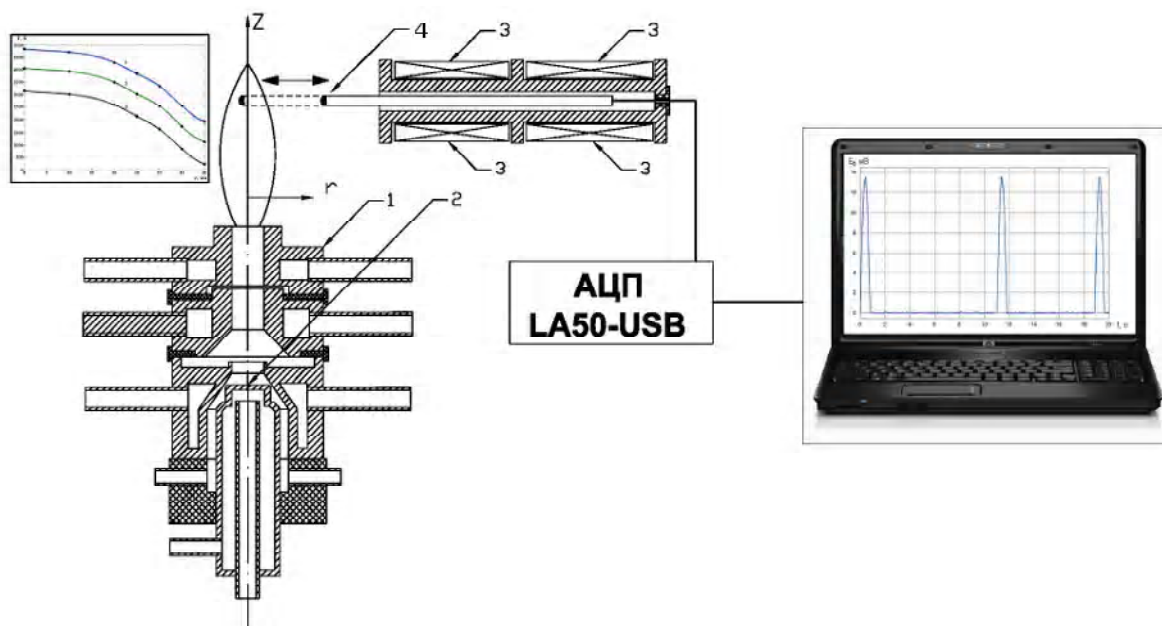
*В статье рассмотрен электротехнический комплекс для измерения температур рабочих потоков низкотемпературной плазмы на основе нестационарного метода динамической термопары.*

**Ключевые слова:** низкотемпературная плазма, плазмотрон, термопара, измерение температуры.

Эффективность плазменной модификации поверхности стекла напрямую зависит от такого важного технологического параметра, как температура исходного материала внедрения. Одним из известных способов определения температуры плазменного потока является спектроскопический метод. Однако многочисленные пульсации в электродуговых плазмотронах приводят к значительным погрешностям в результате измерений, а высокая стоимость оборудования ограничивает широкое применение данного способа. Непосредственное применение пирометров для измерения температуры плазменного потока невозможно, поскольку оптическая толщина газоразрядной плазмы при атмосферном давлении мала [1]. В работах [2–4] измерение температуры рабочих плазменных потоков воздуха, воды и водных растворов солей материалов внедрения предлагается осуществлять нестационарным методом динамической термопары. Однако для уменьшения погрешности определения теплового потока необходимо обеспечить точный ввод спая термопары в определенную зону плазменного потока.

Целью статьи является построение профилей температур плазменных потока при работе плазмотронов для поверхностной модификации стекла на воздухе, воде и водных растворах солей. Диаметр сопла плазмотрона  $d_c = 20 \dots 25$  мм, величина тока  $I = 100 \dots 110$  А, расход плазмообразующего газа (воздух)  $G = 0,0021$  кг/с.

Метод динамической термопары основан на измерении поглощенного тепла в датчике. Разработанная принципиальная схема измерительного комплекса представлена на рис. 1. Термопара типа ППР (4) вводилась в плазменный поток при помощи электромагнита (3), обеспечивающего высокую скорость и точность ввода спая в определенную точку объема плазменного потока. Плавная регулировка выдержки времени нахождения термопары в рабочем плазменном потоке предохраняет ее от возможного перегрева и разрушения. Показания сигнала термопары регистрировались при помощи внешнего устройства аналогово-цифрового преобразования ЛА-50USB с дальнейшей обработкой на персональном компьютере.



**Рис. 1.** Принципиальная схема электротехнического комплекса для измерения температуры:

1 – анод; 2 – катод; 3 – электромагниты; 4 – термопара

Аналогово-цифровой преобразователь ЛА-50USB имеет следующие технические характеристики:

- количество аналоговых каналов – 8 дифференциальных или 16 однополюсных;
- входное сопротивление – не менее 100 МОм;
- тип АЦП – последовательного приближения;
- количество бит в выходном регистре АЦП – 10;
- диапазон частот выборок – 0,12 Гц... 20 кГц;
- время преобразования – 50 мкс.

Плотность теплового потока поглощенного термопарой вычислялась с помощью выражения [3]

$$q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{d_c}{6} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где  $d_c$  – диаметр спая термопары, м;  $c_p$  – теплоемкость термопары, Дж / (кг·К);  $c$  – плотность материала, кг / м<sup>3</sup>.

При нагреве небольшой сферы высокотеплопроводного материала, для которого критерий Био  $Bi$ , характеризующий связь между полем температур в материале и условиями теплоотдачи на его поверхности, мал,  $Bi < 0,01$ , перепадом температур внутри частицы и на ее поверхности можно пренебречь [2]. В этом случае изменение температуры сферы (единой для всех точек внутри нее) во времени описывается уравнением [3]

$$\frac{dT_c}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot F_c}{c_p \cdot \rho \cdot V_c} \cdot (T - T_c), \quad (2)$$

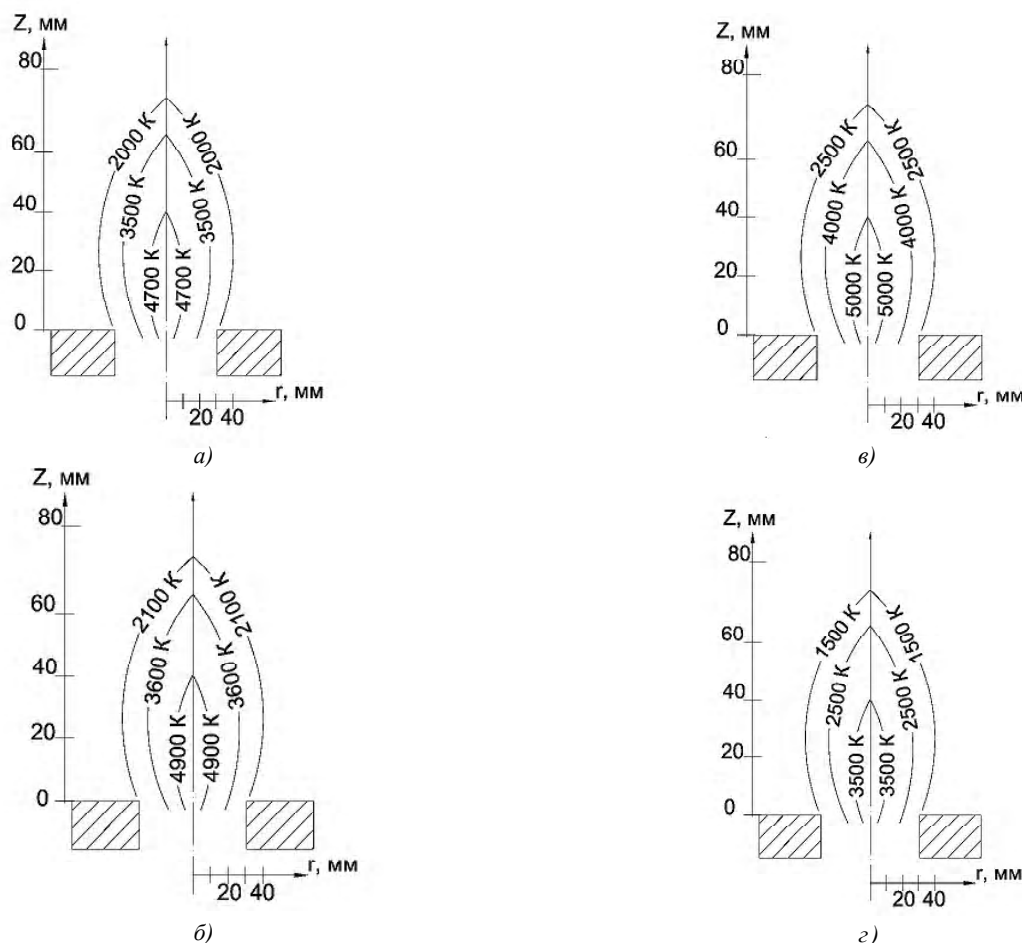
где  $T$  – температура плазменного потока, К;  $T_c$  – температура термопары, К;  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности материала спая термопары, Вт / (м<sup>2</sup>·К);  $F_c$  – площадь поверхности спая термопары, м<sup>2</sup>;  $V_c$  – объем спая термопары, м<sup>3</sup>.

В случае, если термопара неподвижна относительно плазменного потока  $Nu = 2$  (бесконвективный нагрев) и находится в области с приблизительно постоянной температурой из уравнения (2) можно определить время нагрева термопары от температуры  $T_0$  до температуры  $T_1$  [3]:

$$\tau = \frac{c_p \cdot \rho \cdot d^2}{12\lambda} \cdot \ln \frac{T - T_0}{T - T_1}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время нагрева термопары от температуры  $T_0$  до температуры  $T_1$ ;  $\lambda$  – теплопроводность материала термопары, Вт / (м·К).

Результаты экспериментальных исследований позволили впервые построить профили температур плазменных потоков при работе исследуемых плазмотронов на воздухе, воде и водных растворах солей (рис. 2). Температуры



**Рис. 2.** Профили температур плазменных потоков: а – водный раствор  $CuSO_4$ ; б – водный раствор  $CoCl_2$ ; в – вода; г – воздух

ратура плазменного потока существенно зависит от материала внедрения, который подается в плазменный поток. На дистанции обработки 40 мм осевая температура составляет 4700 К при работе плазмотрона с насыщенным раствором  $\text{CuSO}_4$ , 4900 К – с раствором  $\text{CoCl}_2$ , 5000 К – в случае подачи в плазменный поток воды. Минимальная температура на данной дистанции обработки составляет 3500 К при работе исследуемого плазмотрона без использования материала внедрения (рис. 2, з). Анализируя полученные зависимости можно определить оптимальные дистанцию обработки и выдержку времени, обеспечивающие получение высококачественных покрытий при атмосферном давлении без деформации и разрушения стекла.

Предложенный электротехнический комплекс может использоваться для измерения температур плазменных потоков электродуговых плазмотронов при поверхностной модификации стекла. На основании полученных в ходе экспериментальных исследований температурных зависимостей можно определить электрическую мощность дуги, тепловой поток через единицу длины канала,

потери энергии через стенки дуговой камеры, тепловой к. п. д. плазмотрона и другие параметры, необходимые для обеспечения устойчивой работы электротехнического комплекса для нанесения покрытий на стекло при атмосферном давлении.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРА

1. Магунов, А. Н. Спектральная пирометрия / А. Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №4. – С. 5–28.
2. Жуков, М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
3. Физика и техника низкотемпературной плазмы / [Дресвин С. В., Донской А. В., Гольдфарб В. М., Клубник В. С.]; под общ. ред. С. В. Дресвина. – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.
4. Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики / [под ред. М. Ф. Жукова]. – Новосибирск: Наука, 1977. – 295 с.

*Стаття надійшла до редакції 04.10.2012.*

**І. В. Авдєєв, О. А. Шрам**  
Електротехнічний комплекс для вимірювання температур плазмових потоків при поверхневій модифікації скла

*У статті розглянуто електротехнічний комплекс для вимірювання температур робочих потоків низькотемпературної плазми на основі нестационарного методу динамічної термопари.*

**Ключові слова:** низькотемпературна плазма, плазмотрон, термопара, вимірювання температури.

**I. Avdeev, A. Shrum**  
Electrotechnical complex for temperature measurement plasma fluxes in the surface modification of the glass

*The electrotechnical complex for temperature measurement fluxes of the low-temperature plasma based on the transient method of dynamic thermocouple is considered in the article.*

**Key words:** low-temperature plasma, plasmatron, thermocouple, temperature measurement.

УДК 621.384.5

И. Г. Игнатьев

*Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Института прикладной физики Национальной Академии Наук Украины*

## РАСЧЕТ ИНДУКТОРА ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕННО-ЕМКОСТНОГО ГЕНЕРАТОРА

*Представлены результаты сравнительного анализа ртутного, пружинного конусного и пружинного сферического индукторов зарядного устройства высоковольтного генератора переменного-емкостного типа.*

**Ключевые слова:** высоковольтный генератор, оптимизация, индуктор.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что существует два типа электростатических генераторов (ЭГ) высокого напряжения – электропреобразовательные и электромеханические [1–3]. В электропреобразовательных генераторах применяют

ся преобразователи и коммутирующие схемы, усиливающие напряжение (генераторы импульсного напряжения, Кокрофта-Уолтона и др.). Механические генераторы (например – машины Ван де Граафа, Фелиси, Вимшурста), создают высокое напряжение путем механического перемещения заряженных частиц и сохранения