

УДК 537.525

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛАСТИ СВЕЧЕНИЯ
В РАЗРЯДЕ УНИПОЛЯРНОГО ПРОБОЯ ГАЗА (УПГ)****Н.Н. Бородин, А.И. Герасимов, И.В. Герасимов, Н.А. Лубенин,
Т.П. Копейкина, А.К. Сухов***Костромской государственной университет имени Н.А. Некрасова,**156961 Кострома, Россия*igor_valerger@kmt.n.ru**Аннотация**

Рассматривается начальная стадия появления свечения разрядного столба при униполярном пробое газа (УПГ). Экспериментально установлено, что свечение газа в разряде УПГ изначально появляется со стороны основного объема газа трубки вблизи кромок единственного цилиндрического покрытия-электрода (ПЭ). С ростом амплитуды импульсного высоковольтного потенциала на ПЭ и при уменьшении давления газа (воздуха) область его свечения последовательно распространяется на больший объем газа под поверхностью цилиндрического ПЭ. Наблюдение свечения под всей поверхностью ПЭ (различной по площади) требовало присутствия на ПЭ импульсов потенциала определенной амплитуды. Применение в экспериментах с разрядом УПГ цилиндрического ПЭ позволило обнаружить выполнение закона нормальной плотности тока, наблюдаемого в тлеющем разряде постоянного тока: потребляемый от импульсного источника ток был пропорционален изменению площади поверхности ПЭ, под которой наблюдалась локальная область свечения газа. Установлено, что длина разрядного столба повторяла изменения в объеме свечения газа под поверхностью ПЭ. При объяснении явлений, наблюдаемых в объеме газа разряда УПГ под поверхностью единственного покрытия-электрода, привлекается механизм емкостного наведения зарядов.

**THE INVESTIGATION OF FORMATION OF THE LUMINESCENCE AREA
IN THE UNIPOLAR BREAKDOWN OF GAS (UBG)**

The initial stage of occurrence of a luminescence of the discharge column at unipolar breakdown of gas (UBG) are considered. It is experimentally established, that in the discharge UBG the gas luminescence originally appears at edge of a cylindrical covering-electrode (CE) from the basic volume of gas of a discharge tube. The volume of a luminescence of gas under a surface cylindrical CE consistently increases with growth of amplitude of pulse high-voltage potential on CE and at reduction of pressure of gas (air). The observation of luminescence under all surface of CE (various on the area) demands presence on CE of impulses of potential of certain amplitude. The use in experiments with discharge UBG of cylindrical CE has allowed to find out the realization of the law of normal density of the current observed in the glow discharge of a direct current: the current consumed of the discharge was proportional to change of the area of surface CE under which the local area of a luminescence of gas was observed. It is established, that the length of the discharge column repeated changes in volume of a luminescence of gas under surface CE. At an explanation of the phenomena observed in volume of gas of discharge UBG under a surface of only one covering-electrode, the mechanism of capacitor induction of charges is attract.

I. В научных исследованиях и в повседневной лабораторной практике свойства безэлектродных разрядов используются довольно часто, однако физический механизм этих разрядов остается изученным еще недостаточно. Одним из таких малоизученных разрядов является и безэлектродный разряд униполярного пробоя газа (УПГ) [1-3], в котором им-

пульсный подвод электрической энергии осуществляется через единственное покрытие-электрод (ПЭ), размещаемый на внешней поверхности (торцевой или боковой) стенки длиной (≤ 5 м) стеклянной трубки, в объеме которой возбуждается разряд УПГ. При этом поверхность трубки становится источником электрических зарядов [1] и сильного импульсного электрического поля (до 2-3 кВ/м на расстоянии до метра от поверхности трубки с разрядом [4]).

Размещение единственного электрода в разряде УПГ на одном из концов длинной стеклянной трубки снаружи на ее поверхности является весьма удобной, технологичной для ввода объема этого разряда в активные (рабочие) зоны различных (в том числе и высокотемпературных) реакций при контроле за их ходом и воздействия на их результат (например, при высокотемпературных процессах получения полупроводниковых веществ [5], протекающих через паровую, газовую фазу). При этом процессы, происходящие непосредственно в объеме газа с разрядом УПГ, могут обеспечивать пространственную сепарацию компонент реакции по длине разряда [6] и необходимую длительность реакций в средах (газовых и жидких), контактирующих с объемом разряда. В [7,8] исследуется возможность использования излучательных свойств объема разряда УПГ при экологическом контроле за состоянием воздушной и водных сред, в водосберегающих технологиях.

II. Разряд УПГ является самостоятельным и стационарным при любой (положительной или отрицательной) полярности импульсного потенциала на единственном ПЭ, расположенном снаружи стенки трубки. Устойчивое свечение газа (на длине в 4÷5 метров) [2,3,9] наблюдается в разряде УПГ даже при низкой (10-100 Гц) частоте поступления импульсов потенциала на ПЭ[1]. При этом структура свечения газа вблизи ПЭ такая же [3], как и структура свечения газа вблизи электродов в тлеющем разряде постоянного тока (ТРПТ)[10]. Однако если в разрядном столбе ТРПТ появление такой структуры объясняется эмиссией электронов с поверхности электрода и их последующим размножением в продольном межэлектродном поле [10,11], то в разряде УПГ нет металлических поверхностей, эмитирующих электроны, а холодная (комнатная температура) поверхность стеклянной стенки в качестве таковой рассматриваться не может; отсутствует также и продольное поле, требуемое для размножения электронов. По этой же причине стационарность разряда не может поддерживаться и за счёт вторичной эмиссии электронов от ударов ионов и возбуждённых атомов о поверхность холодной стеклянной стенки.

В этих обстоятельствах актуальными являются вопросы и о механизме появления первичных зарядов, и о механизме их постоянного воспроизводства, достаточного для дальнейшего развития разряда.

III. Свечение газа в разряде УПГ первоначально появляется в его объеме непосредственно под поверхностью цилиндрического ПЭ, которое в экспериментах с УПГ обычно размещается на боковой стенке трубки вблизи одного из ее концов. Для возбуждения разряда используются униполярные (одного знака) импульсы высоковольтного потенциала (амплитуда импульсов - $\varphi_{II} = 0.8 \div 15.0$ кВ) с формой, близкой к треугольной (длительность импульсов по их основанию $\tau_{II} = 0.2 \div 20$ мкс), которые с выхода импульсного генератора с частотой $f_{II} = 0.050 \div 15.0$ кГц поступают на ПЭ. Все эксперименты с УПГ проводятся в среде разреженного воздуха в диапазоне давлений форвакуума ($p = 5 \cdot 10^{-3} \div 10$ Торр).

В качестве материала для цилиндрического ПЭ удобно использовать мелкую (1×1 мм) металлическую сетку, которая позволяет наблюдать изменения в объеме и геометрии области свечения (ОС) газа под поверхностью ПЭ при изменении параметров возбуждения разряда (амплитуды и длительности импульсов потенциала, давления газа).

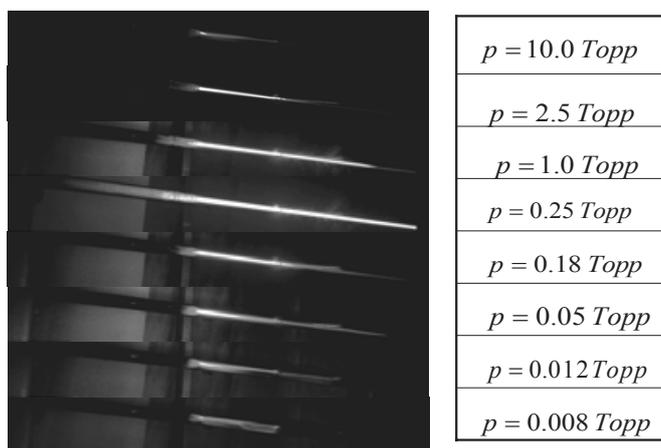


Рис.1. Общий вид свечения газа (воздух) под поверхностью цилиндрического ПЭ (в левой части фото) и на длине разрядного столба при изменении давления в объеме разряда. Диаметры трубки: внешний - $R_{Tp} = 22.4 \text{ мм}$; внутренний - $r_{Tp} = 19.5 \text{ мм}$. Длина покрытия-электрода (стальная сетка $1 \times 1 \text{ мм}$) – 775 мм ; амплитуда импульсов потенциала на ПЭ $\varphi_H = 5.4 \text{ кВ}$, частота их следования $f_H = 14.4 \text{ кГц}$, длительность импульсов $t_H = 10 \text{ мкс}$.

Размещение ПЭ у торцевой стенки трубки обнаружило, что свечение газа всегда появляется вблизи кромок ПЭ со стороны основного его объема в трубке и имеет геометрию короткого светящегося цилиндра с резкими границами со стороны торцевой стенки, рис.2. При последовательном росте амплитуды импульсов φ_H на ПЭ (при $p = const$) объем ОС под поверхностью ПЭ (его длина l_{OC}) также последовательно увеличивается в направлении торцевой стенке трубки, начиная от кромок ПЭ, рис.2. Рост l_{OC} ОС предполагает соответствующее увеличение площади $S_{OC} = 2\pi R_{Tp} \times l_{OC}$ той части поверхности ПЭ (изолированной от газа стеклянной стенкой трубки), под которой наблюдалось свечение газа. При этом изменение тока, потребляемого от источника, повторяет изменение площади S_{OC} поверхности ПЭ, участвующей в развитии разряда УПГ, рис.3. При постоянной амплитуде импульса φ_H и при уменьшении давления газа p увеличение S_{OC} под ПЭ происходит за счет роста длины l_{OC} ОС ($l_{OC} \sim p^{-1}$). При этом потребляемый от источника в импульсе ток i_H не изменяется; резкое уменьшение i_H начинается с момента выполнения равенства $l_{OC} = l_{ПЭ}$.



Рис.2. Вид свечения разряда под ПЭ при различных амплитудах импульсного потенциала.

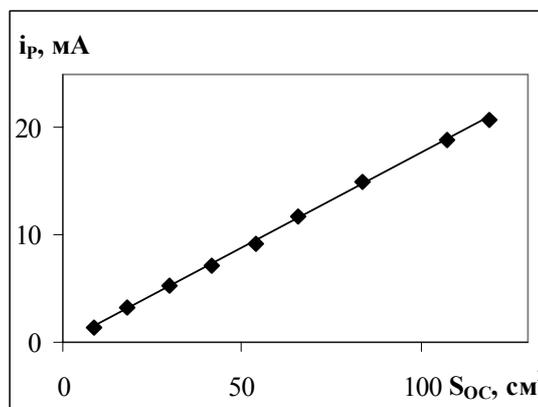


Рис.3. Зависимость между током разряда и площадью области свечения под ПЭ.

Одновременные наблюдения за общей длиной L_p свечения разрядного столба и за длиной l_{oc} ОС со стороны боковой стенки трубки через поверхность ПЭ из металлической сетки, показали следующее: при любых изменениях параметров возбуждения разряда длина L_p разрядного столба повторяет изменения длины l_{oc} (объема V_{oc}) области свечения газа под поверхностью ПЭ, рис.4.

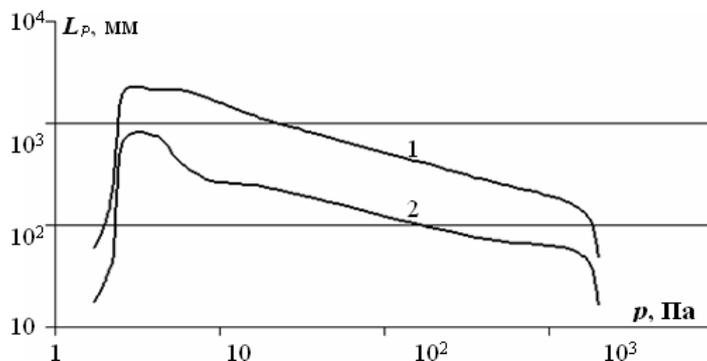


Рис.4. 1 – длина свечения всего разрядного столба; 2 – длина свечения газа под поверхностью цилиндрического покрытия-электрода.

Исследования показали, что при любом значении амплитуды импульсного потенциала φ_{II} наблюдение максимальной длины разряда L_p требует наличия вполне определенной, оптимальной длины $l_{ПЭ}$ ПЭ. При этом длина L_p разрядного столба не увеличивается, если с момента выполнения равенства $l_{oc} = l_{ПЭ}$ (при постоянной длине $l_{ПЭ}$ ПЭ) увеличивается только амплитуда импульса потенциала φ_{II} , рис.4.

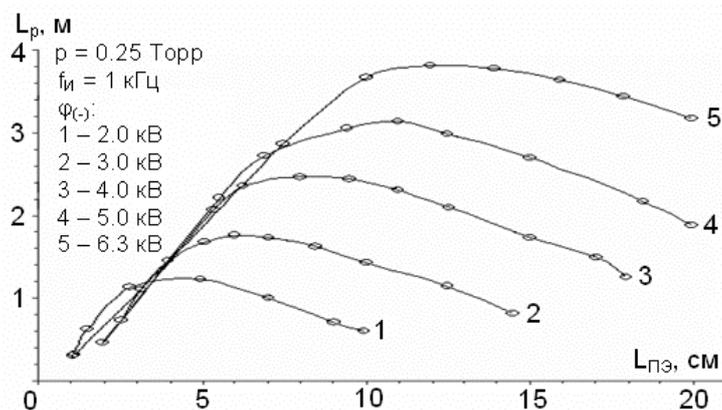


Рис.5. Результаты эксперимента по определению длины покрытия-электрода (ПЭ) $L_{ПЭ}$, которая обеспечивала наблюдение максимальной длины (L_p) свечения газа в разрядном столбе УПГ при различном потенциале на ПЭ. Для наблюдения максимальной длины разряда $L_p = 3.85$ м при давлении воздуха в трубке $p = 0.25$ Torr и амплитуде импульса $\varphi_{II} = 6.3$ кВ требуется ПЭ с его длиной $L_{ПЭ} \geq 13$ см.

Наблюдение свечения газа под всей поверхностью ПЭ с его большой длиной (в экспериментах - 40÷80 см) требовало, во-первых, присутствия на ПЭ импульсов φ_{II} с относительно большой амплитудой ($\geq 5 \div 6$ кВ); во-вторых, оптимального для разряда УПГ [5,12] давления газа $p_{опт}$, – давления, при котором свечение газа в сечении трубки под ПЭ занимало

максимальную площадь (во всех описываемых экспериментах с УПГ это условие выполняется при $p \leq 0.3 \text{ Torr}$).

В целом эксперименты показали, что изменения размеров объема V_{OC} ОС, появляющейся под поверхностью ПЭ, пропорциональны изменениям энергии $\varepsilon_{II} = 0.5\tau_{II}i_{II}\varphi_{II} = q_{ПЭ}\varphi_{II}$, соответствующей единичному импульсу φ_{II} (коэффициент 0.5 учитывает треугольную форму импульса на ПЭ).

Последовательность проникновения свечения в объем газа под поверхность ПЭ, начиная от его края, можно было фиксировать с помощью любых фотоприемников (например, ФЭУ, фотодиодов), располагая один из них вблизи края ПЭ, другой – на границе проникновения свечения газа в его объеме под ПЭ при параметрах возбуждения разряда. При этом передние фронты осциллографических сигналов с обоих фотодиодов (рис.6) были разнесены на время распространения ОС от края ПЭ на максимальную длину под его поверхность. В условиях эксперимента рис.5 (при $\varphi_{II} = 2.0 \text{ кВ}$) длина области свечения газа под ПЭ с $l_{OC} \approx 50 \text{ мм}$ формируется за 18 мкс при длительности импульса φ_{II} , равной $\tau_{II} = 25 \text{ мкс}$.

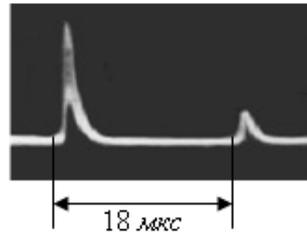


Рис.6. Регистрация распространения области свечения под ПЭ фотодиодными датчиками.

IV. Обсуждение результатов исследований

Наблюдение области свечения (ОС) разреженного газа под цилиндрической поверхностью ПЭ предполагает наличие в этой области зарядов и полей, способных вызвать ионизацию и возбуждение молекул газа. Кроме этого, самостоятельность разряда (а разряд УПГ им является) требует (согласно классическим представлениям, например, [10,11]) постоянного воспроизводства зарядов в приэлектродной области разряда, т.е. под цилиндрической поверхностью ПЭ. Появление или уход свободных, сторонних зарядов с поверхности ПЭ обеспечивается импульсным движением зарядов по единственному участку общей токовой цепи разряда УПГ с током проводимости $\vec{j}_e = \rho\vec{\mathcal{G}}$ – в проводе, соединяющим импульсный генератор (ИИ) с поверхностью ПЭ. Направление переноса зарядов на ПЭ задается полярностью импульсов потенциала φ_{II} : при отрицательной полярности импульсов направление тока \vec{j}_e – к ПЭ; при положительной – от ПЭ.

Закон сохранения полного тока $div(\vec{j}_{CM}^{ПЭ} + \vec{j}_e) = 0$ для замыкания участка цепи разряда между импульсным источником, ПЭ и газовой средой под поверхностью ПЭ требует появления тока смещения $\vec{j}_{CM}^{ПЭ} = \varepsilon_0(\partial\vec{E}_{ПЭ}/\partial t)$, где $\partial\vec{E}_{ПЭ}/\partial t = (\partial q_{ПЭ}/\partial t)(1/\varepsilon_0 S_{ПЭ}) = (\partial\sigma_{ПЭ}/\partial t)(1/\varepsilon_0)$. При этом $\partial q_{ПЭ}/\partial t = C_{ПЭ}(\partial\varphi/\partial t)$; здесь $C_{ПЭ}$ – электрическая емкость той части (S_Q) цилиндрической поверхности $S_{ПЭ}$ ПЭ, с которой потоки вектора $\vec{j}_{CM}^{ПЭ}$ уходят в нормальном к ней направлении в объем газа под ПЭ. В уравнении непрерывности $\int \vec{j}_{CM}^{ПЭ} d\vec{S} = -(\partial q_{ПЭ}/\partial t)$ интеграл $\int \vec{j}_{CM}^{ПЭ} d\vec{S}$ отражает заряд $q_{ПЭ}$, убыль которого в единицу времени связана с потоком

смещения $\vec{j}_{CM}^{ПЭ}$. Очевидно, что при треугольной форме импульса максимумы $q_{ПЭ}$ и $\sigma_{ПЭ} = q_{ПЭ}/S_{ПЭ}$ приходятся на амплитудное значение $\varphi_{ПЭ}$.

Появление в газе под поверхностью ПЭ объемного заряда $Q_V = \rho V_{O3}$ требует от импульсного источника совершения за длительность импульса $t_{ПЭ}$ работы $\varepsilon_{ПЭ} = 0.5 \varphi_{ПЭ} i_{ПЭ} \tau_{ПЭ} = q_{ПЭ} \varphi_{ПЭ}$, причем работа эта состоит из двух частей:

$$\varepsilon_{ПЭ} = \varepsilon_S + \varepsilon_V = \int_{S_Q} (\partial \sigma_S / \partial t) \varphi_{ПЭ} dS + \int_{V_Q} (\partial \rho / \partial t) \varphi_{ПЭ} dV, \text{ где первое слагаемое определяет заряд } Q_S,$$

распределяемый с плотностью σ_S на части (S_Q) поверхности ПЭ, и заряд Q_V , наводимый с объемной плотностью ρ в объеме V_Q под этой поверхностью.

Результаты эксперимента (рис.2,3) и емкостной подход к объяснению начальной фазы разряда предполагают не только равенство зарядов Q_V и Q_S , но и их линейное размещение (распределение, один под другим!) как на цилиндрической поверхности ПЭ, так и в области свечения газа в его объеме под поверхностью S_Q ПЭ. Очевидно, что распределение заряда Q_S по поверхности ПЭ и наведение заряда Q_V в объеме V_Q под ПЭ зависят не только от времени, в течение которого изменяется потенциал импульса, но и от координат локализации зарядов как на поверхности S_Q ПЭ, и в объеме газа под этой поверхностью, т.е. закон сохранения заряда выполняется в форме $-(\partial Q_S / \partial t) = \int_{S_1}^{S_2} (\partial \sigma_S / \partial t) d\vec{S}$ и $-(\partial Q_V / \partial t) = \int_{V_1}^{V_2} (\partial \rho / \partial t) dV$. При

этом геометрия и объем радиально-осесимметричной пространственной локализации заряда Q_V (области свечения, ОС) газа под ПЭ в форме сплошного или пустотелого цилиндра, зависит от параметров возбуждения разряда (амплитуды $\varphi_{ПЭ}$, площади $S_{ПЭ}$ ПЭ и давления газа p) [4,7,9,12].

V. Заключение

Проведенные эксперименты позволили обнаружить и исследовать динамику появления (формирования) области свечения (ОС) газа под поверхностью единственного цилиндрического покрытия-электрода (ПЭ), предшествующую продольному распространению всего разрядного столба. В ходе исследований было установлено, что:

– при поступлении на ПЭ импульсов высоковольтного потенциала изначально свечение газа в разряде УПГ появляется вблизи кромок цилиндрического ПЭ со стороны основного объема газа трубки и при изменении параметров возбуждения разряда последовательно распространяется в объеме газа под поверхностью ПЭ;

– появление свечения газа под всей поверхностью ПЭ (различной по площади) требовало присутствия на ПЭ импульсов потенциала $\varphi_{ПЭ}$ с определенной минимальной амплитудой;

– площадь поверхности ПЭ $S_{OC} = 2\pi R_{Tp} \times l_{OC}$, под которой локализована ОС газа, задает величину тока $i_{ПЭ}$, потребляемого от импульсного источника, - $i_{ПЭ} \sim S_{OC}$, т.е. при возбуждении разряда УПГ выполняется закон нормальной плотности тока, наблюдаемый в ТРПТ [10,11];

– изменения размеров объема V_{OC} области свечения газа под ПЭ пропорциональны изменению амплитуды $\varphi_{ПЭ}$ и длительности $\tau_{ПЭ}$ импульса потенциала на ПЭ, т.е. эти изменения пропорциональны энергии $\varepsilon_{ПЭ} = 0.5 \tau_{ПЭ} i_{ПЭ} \varphi_{ПЭ} = q_{ПЭ} \varphi_{ПЭ}$, затрачиваемой источником в единичном импульсе $\varphi_{ПЭ}$ на ПЭ (коэффициент 0.5 учитывает треугольную форму импульса, $q_{ПЭ}$ - заряд на поверхности ПЭ при появлении ОС газа под этой поверхностью);

– размеры объема V_{OC} области свечения под поверхностью ПЭ задают общую длину L_p свечения газа в разрядном столбе; при этом с момента заполнения областью свечения газа всего его объема под поверхностью ПЭ, т.е. с момента выполнения равенства $l_{OC} = l_{ПЭ}$ длина разрядного столба L_p перестает зависеть (увеличиваться) от амплитуды импульса потенциала φ_{II} на ПЭ.

При рассмотрении явлений, происходящих в объеме газа под поверхностью единственного покрытия-электрода при возбуждении разряда УПГ, привлекается емкостной механизм наведения зарядов.

Авторы признательны Ю.П.Райзеру и С.Т.Суржикову за организацию обсуждения результатов исследований, проводимых в лаборатории физической электроники Костромского государственного университета, на семинаре ИПМех АН РФ.

Материалы представленной работы дважды докладывались на Сессии по неидеальной плазме (2003 и 2004 гг) в Президиуме АН РФ.

Литература

1. Герасимов И.В. Патент РФ N2076381 "Поверхностный и объемный источник зарядов одного знака" (приоритет от 25.03.1991). БИ 1997. N9.С.64.
2. Герасимов И.В. Скорость распространения униполярного пробоя газа. // Журн. техн. физики. 1986. Т.56. №9. С.1840-1843.
3. Герасимов И.В. О распространении униполярного безэлектродного пробоя газа // Физика плазмы. 1988. Т. 14. С. 1240–1247.
4. Герасимов И.В. Излучательные свойства объема разряда униполярного пробоя газа. //Журн. техн. физики. 1994. Т. 65. С. 30–35.
5. Gerasimov A.I., Gerasimov I.V. Some aspects of practical use of radiative properties of the electrodeless discharge of unipolar breakdown of gas (UBG) // Proc. Fifth European Conf. on Thermal Plasma Processes (TPP-5). St.Petersburg. 1998. New York.Begel Hause. V. I. PP.132–137.
6. Gerasimov A.I., Gerasimov I.V. Transporting of components of a steam (gas) phase of the sublimation in the technological processes of obtaining the semiconducting materials by driven free volumetric charges (FVCh's) of electrodeless discharge of unipolar breakdown of gas (UBG) // Proc. XXV Int. Symposium on Plasma Chemistry. Orleans. France. 2001 V. VIII. PP. 3303–3309.
7. Gerasimov A.I., Gerasimov I.V. The application of the volume with the electrodeless discharge of unipolar breakdown of gas (UBG) as a source of free charges in volumes of water conducting solutions // Proc. XXIV Int. Conference on Phenomena in Ionized Gases, Warsaw. - Poland. 1999. V. I. - PP. 25-26.
8. Gerasimov A.I., Gerasimov I.V. Control over the Cleanness of Water Drains of Technological Processes with the Use of Radiative Properties of the Electrodeless Discharge of Unipolar Breakdown of Gas.//Proc.II International Congress "Water: Ecologia and Technologia" (ECWATEC - 96). Moscow. 1996. PP.314-315.
9. Герасимов И.В., Сухов А.К. Исследование распространения разряда униполярного пробоя газа.// Вестник КГУ им. Н.А.Некрасова. - 2005.- №11. - С. 5-10.
10. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.:Наука.1971. С. 293.
11. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. Физика газового разряда. М.: Наука.1987.
12. Gerasimov I.V., A.K.Sukhov, T.P.Kopeikina. Time change of radiant intensity of lines of nitrogen and carbon oxide in unipolar gas breakdown at different pressures.// Proceedings of the Fifth Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-5). Minsk, 2006, PP 94-97.

Статья поступила в редакцию 20 января 2010 г.