



УДК 621.325

И.В. Мельник, д-р техн. наук
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
(Украина, 03056, Киев, пр. Победы, 37, корпус 12, 2203,
тел. (044) 4068292, (044) 4549505, e-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

Исследование зависимости энергетической эффективности триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда от его параметров и геометрических размеров электродной системы

Исследована зависимость энергетической эффективности триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда от ускоряющего и управляющего напряжения, приведенного давления в разрядном промежутке, а также от геометрических размеров электродной системы с использованием средств математического моделирования. Показано, что энергетическая эффективность увеличивается с увеличением напряжения на управляющем электроде, и это позволяет эффективно управлять мощностью формируемого электронного пучка при стабильном давлении в разрядном промежутке.

Досліджено залежність енергетичної ефективності триодних джерел електронів високовольтного тліючого розряду від прискорюючої та керуючої напруги, приведенного тиску у розрядному проміжку, а також від геометричних розмірів електродної системи з використанням засобів математичного моделювання. Показано, що енергетична ефективність зростає із збільшенням напруги на керуючому електроді, і це дозволяє ефективно керувати потужністю електронного пучка за умови стабільного тиску у розрядному проміжку.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электронно-лучевые технологии, высоковольтный тлеющий разряд, триодные источники электронов, анодная плазма, электродная система.

Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с анодной плазмой широко применяются в различных отраслях промышленности. С их помощью осуществляются такие технологические операции: сварка тонкостенных изделий в низком и среднем вакууме, нанесение композитных покрытий в среде активных газов, отжиг малогабаритных изделий, вакуумный переплав тугоплавких металлов для их рафинирования [1 — 3].

© И.В. Мельник, 2013

Основные технико-экономические преимущества технологических источников электронов на основе ВТР, обеспечивающие их широкое применение в современных электронно-лучевых технологиях, следующие [1].

1. Термические операции можно проводить в низком и среднем вакууме, в среде различных технологических газов, включая активные и инертные, что позволяет учитывать требования конкретного технологического процесса.

2. Электронно-лучевое оборудование с источниками электронов ВТР не требует использования дополнительных средств высоковакуумной откачки.

3. Простая конструкция источников электронов ВТР позволяет проектировать относительно дешевое технологическое оборудование.

4. Высокая стабильность работы источников электронов ВТР позволяет получать изделия высокого качества при проведении технологических операций в среде различных газов, в том числе активных, что особенно важно при нанесении в низком вакууме в контролируемой газовой среде керамических покрытий, в состав которых входят активные газы [1].

5. Относительная простота управления мощностью формируемого электронного пучка.

Управление мощностью пучка можно осуществлять двумя способами:

1) газодинамическим — автоматическим регулированием давления в камере источника при неизменном ускоряющем напряжении [4];

2) электрическим — подачей управляющего напряжения на дополнительный электрод и зажиганием несамостоятельного вспомогательного разряда [5].

Однако результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований показали, что газодинамическое управление мощностью электронного пучка является весьма инерционным и постоянная времени регулирования в таких системах управления обычно превышает 0,1 с [4].

Постановка задачи. В работах [5—7] рассмотрены основные преимущества электрического управления током электронного пучка в триодных электродных системах ВТР. Такое управление является малоинерционным и позволяет получать высококачественные изделия вследствие высокого уровня стабилизации мощности пучка. Перспективным также является использование триодных электронных пушек ВТР для формирования интенсивных импульсных электронных пучков [3].

В работах [5, 6] исследованы зависимости положения границы анодной плазмы, токов основного и вспомогательного разрядов, а также энергетической эффективности триодных источников электронов от ускоряющего напряжения, напряжения горения вспомогательного разряда и от приведенного давления в разрядном промежутке. Полученные теорети-

ческие зависимости основаны на анализе потоков заряженных частиц в анодной плазме с учетом условия самостоятельности горения ВТР и влияния вспомогательного разряда на ионизацию газа [8].

Следует заметить, что полученные в [5, 6] зависимости положения границы анодной плазмы от параметров горения ВТР — достаточно универсальны и в них входят геометрические параметры разрядного промежутка. Полученная математическая модель основана на аналитических соотношениях, проста, но достаточно эффективна. В ней учтены все основные физические процессы, связанные с ионизацией газа и диффузией заряженных частиц в анодной плазме. Достигнутая точность моделирования по сравнению с экспериментальными данными составила приблизительно 15 % [6].

Поскольку проектировщиков электронно-лучевого оборудования на предварительном этапе проектирования интересуют зависимости энергетической эффективности источника электронов не только от параметров горения разряда, но и от геометрических размеров электродов, представляем результаты исследования этих зависимостей.

Методика расчета энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР. При расчете энергетической эффективности источников электронов ВТР в первую очередь необходимо определить продольный размер анодной плазмы и концентрацию частиц в ней [5, 6]. Положение границы анодной плазмы относительно катода определяется посредством анализа баланса ионов в ней с учетом условия самосогласованности горения ВТР. Соответствующая система уравнений имеет аналитическое решение, которое может быть представлено в виде [6]

$$\lambda_e = \frac{2,25 kT_e (eU_p + kT_e)^2}{\pi e^4 p_{a0} \ln \left(1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_p + kT_e)^3}{\pi p_{a0}}} \right)},$$

$$R_1 = A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} (A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}}, \quad R_2 = f \eta_i \eta_U^{-a_i} k_e,$$

$$R_3 = 3(kT_e + eU_p) N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{kT_e + eU_p}{2\pi m_e}} \exp \left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_p} \right),$$

$$R_4 = \mu_{i0} (kT_e + eU_p) \left(\frac{\pi}{p_{a0}} \right)^2 \left(1 + \frac{\gamma d}{\lambda_e} \right), \quad R_5 = R_1 R_2 p_{a0} Q_{ep0}, \quad (1)$$

$$C_y = -\frac{R_1 + R_3 + R_1 R_2}{R_5}, \quad D_y = \frac{R_4}{R_5}, \quad p = -\frac{C_y^2}{3}, \quad q = \frac{2C_y^3}{27} + D_y,$$

$$D = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2, \quad u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}}, \quad v = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}}, \quad y = u + v,$$

$$d_{\text{п}} = y - \frac{C_y}{3}, \quad d_{\text{к.п}} = l - d_{\text{п}},$$

где $U_{\text{уск}}$ — ускоряющее напряжение; $U_{\text{р}}$ — напряжение горения вспомогательного разряда; p_{a0} — приведенное давление в разрядном промежутке; l и d — продольный и поперечный размеры разрядного промежутка; $d_{\text{п}}$ — продольный размер анодной плазмы; $d_{\text{к.п}}$ — расстояние от катода до границы анодной плазмы; $r_{\text{к}}$ — поперечный размер катода; $j_{\text{ек}}$ — плотность тока электронов на поверхности катода; n_e — концентрация электронов в плазме; T_e — температура электронов в плазме с учетом ее нагрева электронным пучком; N_0 — постоянная Ломшмидта; η_i и η_U — коэффициенты отражения электронов от анода ВТР по току и по энергии; f — коэффициент прозрачности анода; γ — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности анода ВТР; U_i — потенциал ионизации газа; μ_{i0} — подвижность ионов в анодной плазме для данного рода газа; k_e — коэффициент удлинения траекторий электронов; λ_e — длина свободного пробега электронов в анодной плазме; Q_{ep0} — сечение рассеяния электронов на ионах остаточного газа; α_i — эмпирическая постоянная для данного газа; A_i, a_i — полуэмпирические коэффициенты; C_y и D_y — коэффициенты решаемого уравнения; D — дискриминант этого уравнения; R_1 — R_5, p, q, u, v и y — вспомогательные переменные. Тогда концентрацию ионов в анодной плазме n_i можно определить из следующих соотношений [5, 6]:

$$C_1 = A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} (1 + A_i U_{\text{уск}}^{-a_i} (1 + \eta_i \eta_U^{-a_i} (1 - f(1 - d_{\text{п}} p_{a0} Q_{ep0})))),$$

$$C_2 = \frac{\pi^2 \mu_{i0}}{(d_{\text{п}} p_{a0})^2} \left(1 + \frac{\gamma d}{\lambda_e}\right) - C_4, \quad C_3 = (kT_e + eU_{\text{р}}) \exp\left(-\frac{U_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{\text{р}}}\right) C_2, \quad (2)$$

$$C_4 = 3 N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_{\text{р}})}{2\pi m_e}}, \quad n_i = \frac{C_1}{C_3},$$

где C_1, C_2, C_3 и C_4 — вспомогательные переменные. С учетом соотно-

шений (1), (2), ток вспомогательного разряда определим из соотношения [5]

$$I_p = en_i \pi r_{\text{п}} (1 + \gamma) (r_{\text{п}} + 2d) \sqrt{\frac{2eU_p}{m_i}}, \quad r_{\text{п}} = \frac{d}{2}, \quad (3)$$

где m_i — масса ионов рабочего газа. Тогда ток основного разряда можно рассчитать по формуле [9]

$$I_e = r_{\text{к}}^2 n_i (1 + A_i U_{\text{уск}}^{-a_i}) \sqrt{\frac{\pi e d_{\text{п}} (kT_e + eU_p)}{2m_e}}. \quad (4)$$

Из соотношений (1)—(4), принимая во внимание потери энергии на электродах, можно оценить энергетическую эффективность триодных источников электронов. Как известно, энергетическая эффективность диодных источников электронов ВТР определяется из следующих полуэмпирических соотношений [10, 11]:

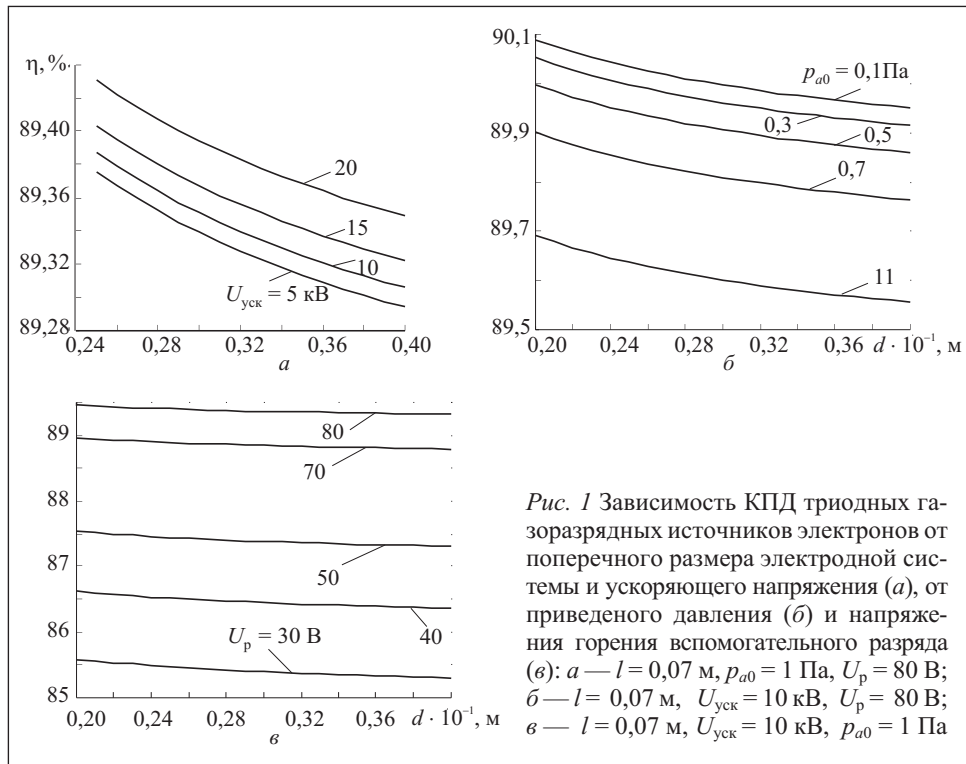
$$\eta_{\text{д}} = 1 - \frac{2 + k_d (1 + 2k_d \gamma \mu_{i0})}{2k_d (1 + \gamma k_d)}, \quad k_d = l p_{a0} \overline{Q_{i0}}, \quad (5)$$

где $\overline{Q_{i0}}$ — усредненное сечение перезарядок ионов на атомах остаточного газа.

С учетом полученных соотношений (3)—(5) можно рассчитать энергетическую эффективность триодных источников электронов ВТР [12]:

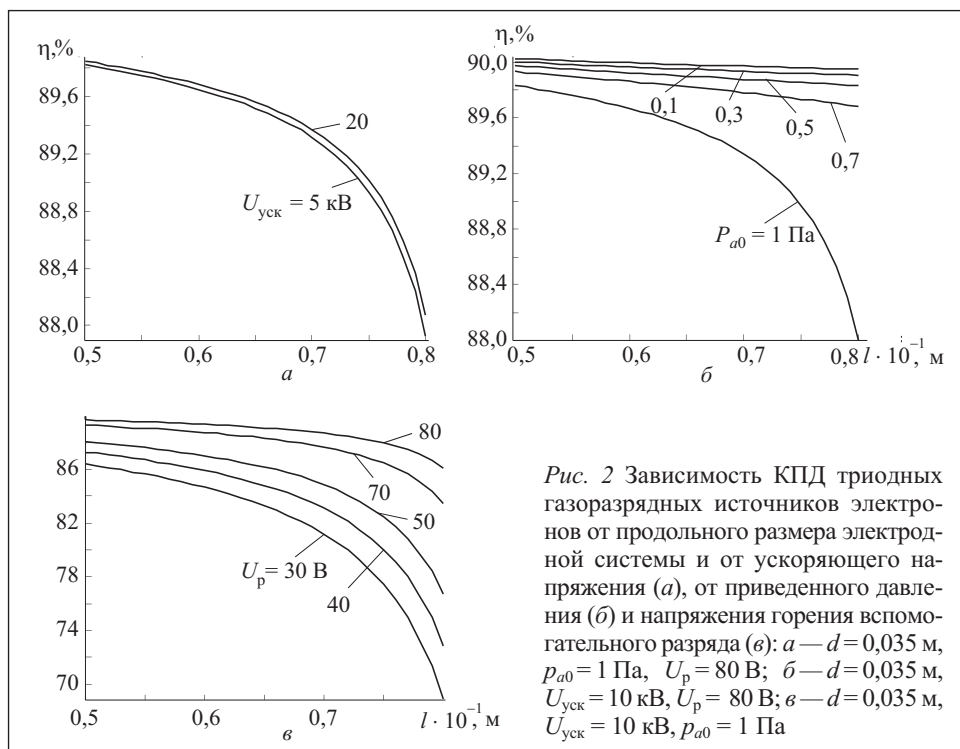
$$\eta_{\text{т}} = \frac{\eta_{\text{д}}}{1 + \frac{\eta_{\text{д}} U_p I_p}{U_{\text{уск}} I_e}}. \quad (6)$$

Расчеты энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР в соответствии с соотношениями (1) — (6) были проведены для алюминиевого катода и медного анода, в качестве рабочего газа рассматривался азот. Для расчетов использованы следующие коэффициенты [5, 6]: $U_i = 18 \text{ В}$; $T_e = 800 \text{ К}$; $a_i = 0,343$; $\alpha_i = 1,452$; $\eta_i = 0,7$; $\eta_U = 0,95$; $f = 0,99$; $\gamma = 4,6$; $\mu_{i0} = 1,27 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{М}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right]$; $Q_{ep0} = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2}$; $A_i = 3,8 \cdot 10^{-6}$. Выбранный диапазон рабочих давлений составлял $P_{a0} = 0,1 \div 1,0 \text{ Па}$ при $U_{\text{уск}} = 5 \div 30 \text{ кВ}$ и $U_p = 30 \div 100 \text{ В}$. Геометрические размеры моделируемой системы: $l = 0,05 \div 0,08 \text{ м}$, $d = 0,02 \div 0,04 \text{ м}$. Полученные зависимости энергетической эффективности источников электронов от продольного и поперечного размеров разрядного промежутка, а также от ускоряющего напряжения, напряжения горения вспомогательного разряда и приведенного давления представлены на рис. 1 и 2.



Анализ результатов моделирования. На основании полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что энергетическая эффективность триодных источников электронов практически не зависит от ускоряющего напряжения. При возрастании ускоряющего напряжения, в соответствии с соотношением (5), увеличивается длина свободного пробега электронов в разрядном промежутке, что способствует увеличению энергетической эффективности источника. Однако, как видно из рис. 1, *а*, 2, *а*, энергетическая эффективность источника электронов с возрастанием ускоряющего напряжения увеличивается незначительно.

Более значительно на энергетическую эффективность источника электронов влияет значение приведенного давления в разрядном промежутке. Это обусловлено двумя причинами: увеличением тока вспомогательного разряда и влиянием элементарных и коллективных взаимодействий заряженных частиц в анодной плазме и падением потенциала на катоде. Как видно из рис. 1, *б* и 2, *б*, с увеличением приведенного давления в разрядном промежутке энергетическая эффективность источника электронов уменьшается.



Из рис. 1, в и 2, в видно, что энергетическая эффективность триодных источников электронов ВТР увеличивается с увеличением напряжения горения вспомогательного разряда. Это обусловлено тем, что ток основного разряда с увеличением напряжения горения вспомогательного разряда возрастает быстрее, чем ток вспомогательного разряда. Таким образом, существует три возможных пути повышения энергетической эффективности источника электронов без изменения геометрии электродной системы:

- 1) повышение ускоряющего напряжения;
- 2) уменьшение давления в разрядном промежутке ВТР;
- 3) увеличение напряжения горения вспомогательного разряда.

Пути 1 и 2 реализовать в технологическом электронно-лучевом оборудовании достаточно сложно. Величина ускоряющего напряжения определяется требованиями технологического процесса и ее изменение связано с определенными техническими трудностями [1, 3, 10]. Величина изменения давления также связана с требованиями технологического процесса, и его изменение в разрядной камере оказывает существенное влияние на физические условия в зоне обработки изделия [2].

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволяют сделать вывод о том, что наилучшим способом для повышения энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР является повышение напряжения на управляющем электроде. Результаты экспериментальных исследований показали, что в реальных конструкциях триодных источников электронов управляющее напряжение на вспомогательном электроде может составлять величину порядка нескольких сотен вольт.

Из рис. 1 и 2 видно, что все полученные зависимости энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР от геометрических параметров исследуемых электродных систем являются убывающими, т.е. с увеличением размеров электродов энергетическая эффективность триодных источников электронов ВТР уменьшается. Это обусловлено следующими причинами.

При увеличении продольного и поперечного размеров электродной системы увеличивается относительное число взаимодействий заряженных частиц в разрядном промежутке, в результате чего увеличиваются потери энергии в объеме разряда [1, 8]. При увеличении поперечного размера электродной системы возрастает ток ионов с поверхности анодной плазмы и ток электронов с поверхности катода, но при этом увеличивается степень ионизации газа и возрастает ток вспомогательного разряда [6].

Обычно поперечный размер электродной системы выбирают, исходя из необходимого значения тока электронного пучка. Это связано с тем, что плотность тока электронов с поверхности холодного катода при стационарном режиме горения ВТР ограничена и составляет не более $0,1 \text{ A/cm}^2$ [1, 2, 8]. Следовательно, основной задачей проектирования технологических источников электронов ВТР является не повышение их энергетической эффективности, а достижение требуемого значения тока электронного пучка при заданном ускоряющем напряжении. Однако для триодных электродных систем ВТР, в соответствии с рис. 1, в, возможно повышение их энергетической эффективности в результате увеличения напряжения на управляющем электроде.

Продольный размер электродной системы при проектировании источников электронов ВТР определяют, исходя из электронно-оптических свойств проектируемого источника и минимизации энергетических потерь в результате оседания электронов пучка на поверхности анода [11]. Электронно-оптическая задача при условиях ВТР — значительно более сложная, чем расчет распределения энергии. Эта задача решена теоретико-экспериментальным способом и описана в работе [13].

При решении электронно-оптической задачи для реальных триодных электродных систем ВТР положение и форму границы анодной плазмы определяли, исходя из компьютерного анализа фотографий разрядного промежутка. При этом граница плазмы рассматривалась как источник

ионов и как электрод с заданным потенциалом. В соответствии с экспериментальными данными о геометрии анодной плазмы проведены расчеты распределения электрического поля и траекторий частиц с учетом пространственного заряда, а также фокальных параметров формируемого электронного пучка. Тем не менее, как видно из рис. 2, в, повысить энергетическую эффективность триодного источника электронов ВТР можно также повышением напряжения на ускоряющем электроде.

Таким образом, подбором геометрических размеров электродной системы, величины приведенного давления в разрядном промежутке и управляющего напряжения на дополнительном электроде можно достичь высокой энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР, а именно порядка 90 %. Приблизительно такая же величина энергетической эффективности получена и для диодных систем [11].

Значение ускоряющего напряжения незначительно влияет на энергетическую эффективность источников электронов ВТР. Поэтому при достаточно стабильном уровне ускоряющего напряжения от промышленных источников питания удастся достичь высокой стабильности мощности формируемого электронного пучка. Однако, как видно из рис. 1, б, 2, б, энергетическая эффективность источников электронов ВТР существенно зависит от приведенного давления в разрядном промежутке. В связи с этим при регулировании мощности электронного пучка посредством изменения напряжения на ускоряющем электроде необходимо стабилизировать и значение приведенного давления в области горения разряда. Такой подход к проектированию систем управления мощностью электронного пучка, формируемого триодными источниками электронов ВТР, позволяет уменьшить время регулирования мощности при высокой энергетической эффективности источника и высокой стабильности фокальных параметров формируемого пучка.

Особенно перспективно использование импульсных электронных пучков, формируемых в триодных электродных системах ВТР, в которых времена изменения тока электронного пучка могут составлять порядка десятков и сотен микросекунд. Электронные пучки с кратковременной импульсной модуляцией могут найти широкое применение в современных электронно-лучевых технологиях при высококачественной сварке изделий большой толщины, при нанесении полиметаллических покрытий, а также при получении высококачественных полиметаллических сплавов [3, 10].

Выводы

Полученные зависимости энергетической эффективности триодных источников электронов ВТР от ускоряющего напряжения, управляющего напряжения, приведенного давления в разрядном промежутке и геометрических размеров промежутка весьма эффективны при условии электрического управления током разряда для поддержания установленного значения рабочего давления газа.

Результаты проведенных теоретических исследований показали, что максимальная энергетическая эффективность триодных источников электронов ВТР и диодных электродных систем ВТР составляет приблизительно 90 %. Высокая энергетическая эффективность и малая величина постоянной времени регулирования мощности электронного пучка при электрическом управлении свидетельствуют о высоких технико-экономических показателях триодных газоразрядных электронных пушек и о перспективности их использования в современном промышленном электронно-лучевом оборудовании.

The dependence of energetic efficiency of triode high voltage glow discharge electron sources on the accelerating voltage, control voltage, reduced pressure in discharge gap, as well as on geometry parameters of the electrodes system, with the use of means of mathematical modelling has been investigated in the article. It is shown, that the energetic efficiency is strongly increased with increasing the voltage on the driving electrode, and this fact allows controlling the power of the formed electron beam with stable pressure in the discharge gap.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завьялов М.А., Крейнфельд Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
2. *Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А.* Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности // *Электроника и связь. Тем. вып. «Проблемы электроники».* Ч. 2. — Киев: «Политехника», 2005. — С. 84—87.
3. *Ладохин С.В., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б. и др.* Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. — Киев: «Сталь», 2007. — 605 с.
4. *Мельник И.В., Тугай С.Б.* Исследование пропускной способности дозирующего устройства натекателя газа для газоразрядной электронной пушки // *Электроника и связь.* — 2011. — № 5 (64). — С. 25—30.
5. *Мельник И.В., Тугай С.Б.* Моделирование вольт-амперных характеристик несамостоятельного вспомогательного разряда в триодных газоразрядных электронных пушках. // *Электрон. моделирование.* — 2012. — 34, № 5. — С. 103—114.
6. *Мельник И.В., Тугай С.Б.* Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда. // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* — 2012. — 55, № 11. — С. 50—59.
7. *Denbnovetsky S.V., Melnik V.I., Melnik I.V., Tugay B.A.* Investigation of forming of electron beam in glow discharge electron guns with additional electrode. — XVIII-th Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (XVIII ISDEIV). August, 17—21, 1998. The Netherlands, Proc. Vol. 2. — Eindhoven Technical University Edition, 1998. — P. 637—640.

8. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
9. Денбновецький С.В., Мельник І.В., Мельник В.Г., Тугай С.Б. Моделювання вольт-амперних характеристик триодних технологічних джерел електронів високовольтного тліючого розряду з урахуванням процесів взаємодії заряджених часток в анодній плазмі // Наук. вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». — 2012. — № 5 (85). — С. 12 — 18.
10. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Онищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы. — М. : Наука, 1986. — 171 с.
11. Мельник І.В. Теоретические оценки влияния нагрева электродов и рабочего газа на энергетические параметры источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // Электроника и связь. — 2004. — 9, № 21. — С. 14—16.
12. Мельник І.В. Расчет энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // Тр. XXIII междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 8 — 13 июля 2013 г. Под ред. Г.Г. Бондаренко. — М. : ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2012. — С. 351—358.
13. Мельник І.В., Тугай С.Б. Исследование электронно-оптических свойств триодных электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с учетом положения и формы границы анодной плазмы // Электроника и связь. — 2011. — № 2 (61). — С. 9—13.

Поступила 01.07.13

МЕЛЬНИК Игорь Витальевич, д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». В 1989 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование электронно-лучевых технологических устройств, теория газового разряда, программирование и теория алгоритмов.

