

УДК 533.9.07:537.533

И.В. Мельник, д-р техн. наук, С.Б. Тугай

Исследование пропускной способности дозирующего устройства натекателя газа для газоразрядной электронной пушки

Предложена модель натекателя с коническим штоком, который используется для управления током электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда. Из-за сложности геометрии узлов натекателя математическая модель дозирующего узла уточнялась путем подбора эмпирических коэффициентов и их аппроксимации. На основе данных моделирования и эксперимента проведен анализ зависимостей эксплуатационных характеристик натекателя от геометрических параметров дозирующего узла. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании стабильности работы электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда в составе технологического оборудования.

Model of capacity of valve with conic rod, which is used for control of beam current of high voltage glow discharge electron guns, is considered. Because of complicity of valve details geometry, mathematical model of dozed item is improved by suitable choosing of empirical coefficients and its approximation. On the base of modeling and experimental data analyzing of dependence of valve exploitation characteristics from geometry parameters of dozed item is provided. Obtained results can be used for simulation of stability of operation of high voltage glow discharge electron guns in consisting of technological equipment.

Ключевые слова: электромагнитный натекатель, дозирующий узел, вакуумная проводимость, пропускная способность, система напуска газа.

Введение

В современных технологических процессах для выполнения многих термических операций в вакууме широко применяются электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом, которые характеризуются длительным сроком службы катода, устойчивостью работы в среде различных газов в широком диапазоне давлений, возможностью формирования пучков различной мощности, относительной простотой и надежностью работы [1]. Так как ток ВТР сильно зависит от давления в разрядном промежутке, то

управление им осуществляют, изменяя давление в области горения разряда с помощью регулируемого напуска газа в пушку при ее непрерывной откачке. Этот способ управления обеспечивает изменение тока пушки во всем ее рабочем диапазоне [1]. Напуск газа осуществляют из газовых магистралей с помощью натекателей, работающих в ручном или в автоматическом режиме, с применением электронных блоков управления. Для большинства технологических процессов, где используются газоразрядные электронные пушки, требуется автоматическое управление их током с высокой точностью и малым временем регулирования во всем рабочем диапазоне пушки. При этом натекатель, используемый в качестве исполнительного устройства, должен иметь малоинерционный электрически управляемый привод, работающий в аналоговом режиме.

Плавность регулирования потока газа, напускаемого в пушку, а также стабильность параметров натекателя, во многом зависят от конструкции и геометрических размеров дозирующего устройства. В работе [2] авторами проведены исследования, направленные на повышение стабильности работы электромагнитного натекателя, а также предложена математическая модель его дозирующего устройства. Это позволяет применять методы и средства компьютерного моделирования при разработке систем автоматического управления током газоразрядных электронных пушек с использованием данного типа натекателя [2]. Дозирующее устройство состоит из штока, на торцевой поверхности которого расположен цилиндрический выступ меньшего диаметра, и седла, выполненного в виде полого цилиндра, внутри которого, вдоль оси симметрии, перемещается выступ штока. Применение такой конструкции дозирующей пары позволило улучшить плавность регулирования потока газа за счет увеличения рабочего хода штока при заданной производительности натекателя и уменьшить его зависимость от температуры по сравнению с натекателями, в которых поток газа определяется проводимостью щели, образованной торцевыми поверхностями полого цилиндра и подвижного штока. Однако рассмотренная конструкция дозирующей пары требует очень высо-

кой точности изготовления и юстировки, при этом изменение температуры натекаателя в процессе его работы вследствие малого зазора между стенкой полого цилиндра и выступом штока, выполненных из материалов с различными коэффициентами линейного расширения, вызывает изменение проводимости дозирующего узла, что ухудшает надежность работы таких натекаателей и усложняет их изготовление.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование характеристик дозирующего устройства натекаателя с коническим штоком, построение его адекватной математической модели, связывающей геометрические параметры с эксплуатационными характеристиками, а также определение эмпирических коэффициентов, позволяющих за счет подбора параметров модели повысить точность расчета газодинамических характеристик дозирующего узла.

1. Постановка задачи

В работе исследуется конструкция дозирующего устройства натекаателя, в которой вместо цилиндрического выступа на торце подвижного штока выполнен выступ в форме усеченного конуса, при этом диаметр большего основания конуса делают равным диаметру полого цилиндра, вдоль оси которого перемещается усеченный конус. В такой конструкции уменьшается вероятность заклинивания штока в седле, а влияние температурного режима на стабильность работы натекаателя может наблюдаться только при малом потоке газа, что в большинстве случаев не ухудшает работу газоразрядных электронных пушек. Эффективное управление током газоразрядных пушек обеспечивается при выборе оптимальных геометрических размеров дозирующей пары натекаателя в зависимости от газодинамических характеристик электронной пушки и вакуумной системы технологической установки. Оптимизация системы управления током пушки осуществляется методами компьютерного моделирования, при этом определяются и согласовываются параметры и передаточные характеристики её отдельных звеньев. Поскольку адекватных математических моделей для расчета элементов вакуумных устройств со сложной геометрией не существует [1], методика моделирования носит теоретико-экспериментальный характер, и параметры модели натекаателя всегда уточняются с учетом экспериментальных данных.

2. Описание конструкции дозирующего устройства натекаателя

Схематическое изображение конструкции дозирующего устройства натекаателя с необходимыми для выполнения расчетов геометрическими параметрами приведено на рис. 1.

Канал течения газа в натекаателе формируется между перемещаемым штоком 1 и цилиндрическим седлом 2, при этом между ними существует зазор шириной a , величина которого изменяется при перемещении штока.

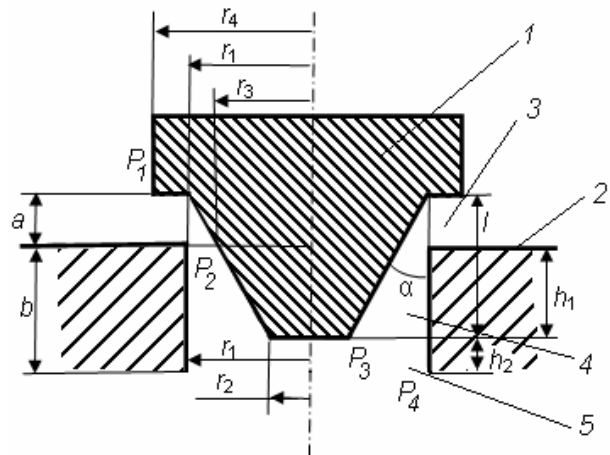


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции дозирующего устройства натекаателя

Как отмечалось выше, в исследуемой конструкции шток имеет коническую форму. В этом случае геометрия дозирующего узла описывается соотношениями (рис. 1):

$$\begin{aligned} h_1 &= l - a; \quad b = h_1 + h_2; \quad r_3 = r_1 - \alpha a; \\ \alpha &= \arctg\left(\frac{r_1 - r_2}{l}\right); \quad r_{cp} = \frac{r_3 + r_2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

r_{cp} – средний радиус рабочей части штока, расположенной внутри седла, а остальные параметры приведены на рис. 1.

Дозирующий узел натекаателя при анализе его вакуумной проводимости представляется в виде трех последовательно соединенных элементов газодинамической системы: кольцевой щели с конической вставкой 3, цилиндрического канала с конической вставкой 4, и обычного цилиндрического канала 5. На рис. 1 обозначены также давления на входе и на выходе каждого из элементов вакуумной системы P_1 , P_2 , P_3 и P_4 .

Следует отметить, что только для обычного цилиндрического канала существует достаточно точное аналитическое соотношение, связывающее его вакуумную проводимость с геометрическими размерами [3]. Для элементов с коническими вставками необходимо использовать

приближенные соотношения, вводя в них соответствующие поправочные коэффициенты. Поэтому для повышения точности моделирования необходимо сравнивать расчетные данные с результатами эксперимента и подбирать соответствующие параметры модели.

3. Расчет проводимостей элементов дозирующего узла

Приведем аналитические соотношения, используемые для расчета вакуумной проводимости всех элементов дозирующего узла моделируемого натекателя.

Вакуумная проводимость U_1 кольцевой щели с конической вставкой (рис. 2) определяется из эмпирического соотношения, которое аналогично соотношению для кольцевой щели без вставки [3], а для учета реальной геометрии системы в него введен поправочный коэффициент $K_d(a)$:

$$U_1 = \frac{1,445 \cdot 10^4 K_d(a) a^3 (P_1 + P_2)}{\ln(r_4) - \ln(\alpha a)}, \quad (2)$$

где P_1 – давление на входе кольцевой щели; P_2 , – на её выходе; $K_d(a)$ – эмпирический коэффициент, учитывающий геометрию конической вставки, который подбирается при анализе результатов моделирования с учетом экспериментальных данных.

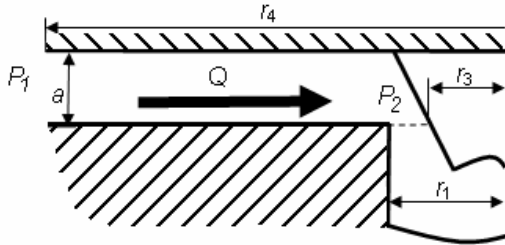


Рис. 2. Геометрия кольцевой щели с конической вставкой

Вакуумная проводимость U_2 цилиндрического трубопровода с конической вставкой (рис. 3) определяется из формулы для проводимости двух коаксиальных цилиндров [1]. Поэтому и в этом случае в исходную формулу вводится поправочный коэффициент $K_k(a)$, позволяющий учесть реальную геометрию моделируемой системы:

$$U_2 = \frac{2,72 \cdot 10^3 K_k(a) (P_2 + P_3)}{h_1} \times \left(4(r_1^4 - r_{cp}^4) - \frac{(r_1^2 - r_{cp}^2)}{\ln(r_1) - \ln(r_{cp})} \right), \quad (3)$$

где P_2 – давление на входе трубопровода; P_3 – на выходе трубопровода, а остальные геометрические параметры показаны на рис. 1 и 3.

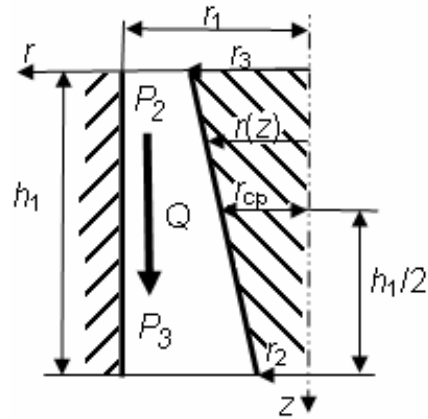


Рис. 3. Схематическое изображение геометрии цилиндрического канала с конической вставкой

Проводимость U_3 обычного цилиндрического трубопровода определяется по известной из вакуумной техники формуле Пуазейля [1]:

$$U_3 = 1,088 \cdot 10^4 \frac{(P_3 + P_4) r_1^4}{h_2}, \quad (4)$$

где P_3 – давление на входе трубопровода; P_4 – на его выходе, остальные геометрические параметры показаны на рис. 1.

4. Методика расчета суммарной проводимости дозирующего узла натекателя

Исходя из основного закона вакуумной техники [3]:

$$Q = \Delta P U, \quad (5)$$

где Q – поток газа; ΔP – разность давлений; U – проводимость, с учетом того, что на всех участках системы подачи газа при последовательном соединении её элементов поток Q одинаков, можно записать пропорции, связывающие значения давлений P_1, P_2, P_3, P_4 с проводимостями элементов вакуумной системы U_1, U_2 и U_3 :

$$G_1 (P_{атм}^2 - P_2^2) = G_2 (P_2^2 - P_3^2); \quad (6)$$

$$G_2 (P_2^2 - P_3^2) = G_3 (P_3^2 - P_n^2), \quad (7)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление, P_n – давление в газоразрядной пушке, $P_1 = P_{атм}$, $P_4 = P_n$. С учетом выражений (2)–(4) коэффициенты G_1, G_2, G_3 соотношений (6), (7) определяются следующим образом:

$$G_1 = \frac{1,445 \cdot 10^4 K_d(a) a^3}{\ln(r_4) - \ln(\alpha a)}; \quad (8)$$

$$G_2 = \frac{2,72 \cdot 10^2 K_k(a)}{h_1} \left(4(r_1^4 - r_{cp}^4) - \frac{r_1^2 - r_{cp}^2}{\ln(r_1) - \ln(r_{cp})} \right); \quad (9)$$

$$G_3 = 1,088 \cdot 10^4 \frac{r_1^4}{h_2}. \quad (10)$$

Из соотношения (6) можно записать:

$$P_2^2 = \frac{G_1 P_{атм}^2 + P_3^2 G_2}{G_1 + G_2}. \quad (11)$$

Подставляя найденное для P_2^2 выражение (11) в соотношение (7), после алгебраических преобразований получаем аналитические выражения для вычисления давлений P_2 и P_3 :

$$P_2 = \sqrt{\frac{G_1 P_{атм}^2 + \frac{G_2 \left(P_n^2 G_3 + \frac{P_{атм}^2 G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right)}{\left(G_3 + G_2 - \frac{G_2^2}{G_1 + G_2} \right)}}{G_1 + G_2}}, \quad (12)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{\left(P_n^2 G_3 + \frac{P_{атм}^2 G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right)}{\left(G_3 + G_2 - \frac{G_2^2}{G_1 + G_2} \right)}}. \quad (13)$$

С учетом изложенного выше проводимости элементов системы подачи газа U_1 , U_2 и U_3 вычисляются из системы уравнений (1)–(4), (8)–(10), (12), (13). Тогда проводимость всей моделируемой системы U_k находим из известного соотношения [3]:

$$\frac{1}{U_k} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}, \quad (14)$$

а поток газа Q определяем из соотношения (5).

5. Анализ результатов моделирования и определение эмпирических коэффициентов

На начальном этапе моделирования при использовании соотношений (2), (3) можно предположить, что $K_d(a) = 1$ и $K_k(a) = 1$. Но если для конической вставки в цилиндр эти условия достаточно точно выполняются в случае $r_1 \approx r_2$, то значение коэффициента $K_d(a)$ необходимо уточнять в соответствии с экспериментальными данными.

На рис. 4 приведено схематическое изображение геометрии моделируемого дозирующего узла и указаны размеры конструкции. На рис. 5 изображены экспериментальные зависимости потока газа Q от тока натекаателя для разных материалов уплотнителей.

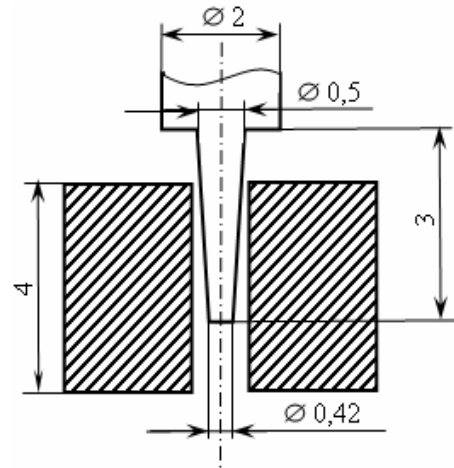


Рис. 4. Геометрия дозирующего узла натекаателя

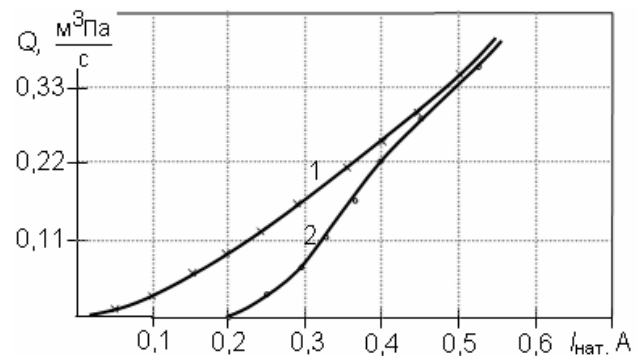


Рис. 5. Экспериментальные зависимости потока газа от тока обмотки электромагнитного натекаателя для резинового (1) и капролонового (2) уплотнителей

Моделирование характеристик натекаателя проводилось для конструкции с капролоновым уплотнителем, поскольку учесть в математических моделях эластичность резины при ее контакте со штоком достаточно сложно. На рис. 6 приведены экспериментальные данные и рассчитанная зависимость потока газа от положения штока. Достигнутая точность аппроксимации экспериментальных данных составила около 30 %, при этом связь между расчетными и экспериментальными данными определялась простым соотношением:

$$U_э = k_э U_p, \quad (15)$$

где $U_э$, U_p – соответственно экспериментальное и расчетное значения проводимости; $k_э$ – коэффициент взаимосвязи между расчетными и экспериментальными данными.

Оптимальное значение коэффициента $k_э$ для исследуемой конструкции дозирующего узла составило 0,83. Тогда, полагая в соотношении (3) $K_k(a) \approx 1$, можно сделать вывод о том, что основная погрешность математической модели, основанной на соотношениях (1)–(14),

обусловлена неадекватным описанием проводимости щели в формуле (2). Для устранения этой погрешности путем изменения значения коэффициента $K_D(a)$ использовалось соотношение, вытекающее из формул (14), (15):

$$K_D(a) = \frac{k_3 U_p U_2 U_3}{U_1 (U_2 U_3 - k_3 U_p (U_2 + U_3))}. \quad (16)$$

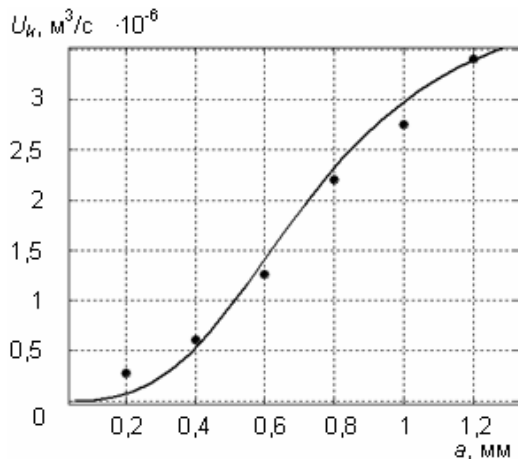


Рис. 6. Расчетная зависимость (кривая) и экспериментальные данные (точки) для проводимости дозирующего узла натекателя

В результате анализа полученных расчетных и экспериментальных данных для вычисления в анализируемой конструкции натекателя коэффициента $K_D(a)$ подобрано простое аппроксимационное аналитическое соотношение:

$$K_D(a) = \frac{a^2}{a^2 + 0,001}. \quad (17)$$

На рис. 7 изображены графики для функции $K_D(a)$, полученные с использованием соотношений (16) и (17). Очевидно, что различие между данными аппроксимации и расчетной зависимостью составляет не более нескольких процентов.

Соотношения (1) – (16) использовались для моделирования влияния геометрических параметров дозирующего узла на эксплуатационные характеристики натекателя. На рис. 8 приведены зависимости проводимости системы подачи газа (рис. 1) от положения штока относительно седла. Данные получены для разных значений радиуса иглы r_2 . Кривые изображенные на рис. 8, а, соответствуют всему рабочему диапазону натекателя, а на рис. 8, б – участку линейной зависимости потока газа от положения штока, который обеспечивает наиболее стабильную работу системы управления током пушки [2]. По результатам моделирования можно сделать вывод, что при дальнейшем уменьшении радиуса иглы r_2 пропускная способность дозирующего узла изменяется незначительно.

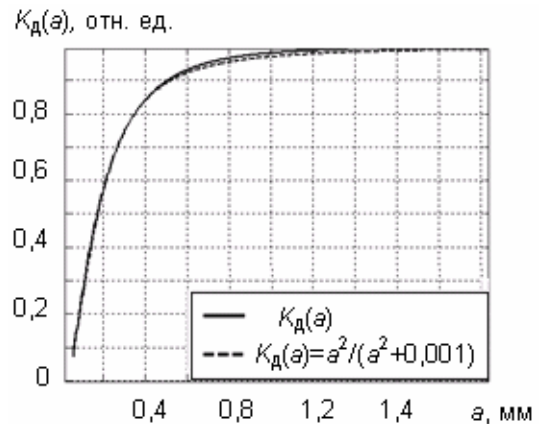


Рис. 7. Расчетные значения коэффициента $K_D(a)$ и их аппроксимационная кривая

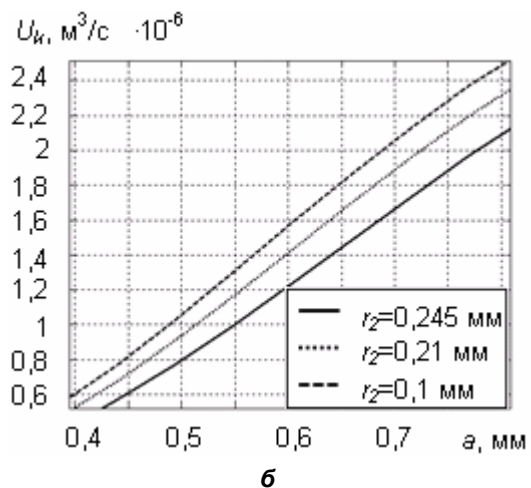
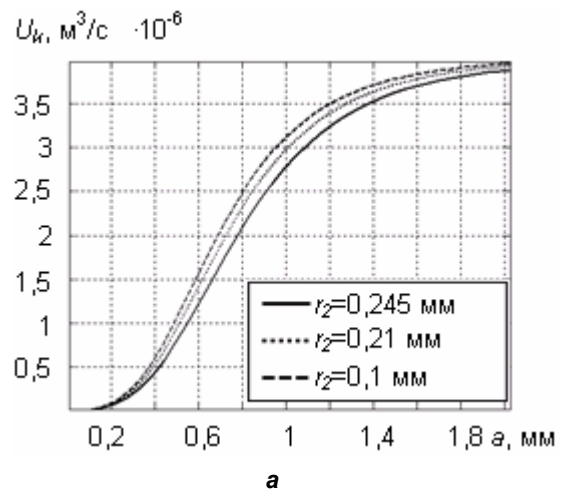


Рис. 8. Зависимости проводимости дозирующего узла натекателя от положения штока относительно седла a – во всем рабочем диапазоне; б – на линейном участке характеристики

Для построения более адекватных моделей элементов дозирующего устройства необходимо численно интегрировать уравнение ламинарного потока с учетом всех физических особенностей его протекания. Соответствующие методики расчета вакуумных систем известны и описаны в работах [4, 5].

Однако этот подход является громоздким, он в значительной степени усложняет математическую постановку задачи и требует использования вычислительных средств большой мощности. Кроме того, анализ результатов численного моделирования всегда достаточно сложен, поскольку он связан с методикой постановки вычислительного эксперимента и с решением громоздких задач многокритериальной оптимизации [6].

В то же время, предложенная в работе модель проста и экономична с вычислительной точки зрения, а для повышения точности моделирования используются эмпирические коэффициенты. С другой стороны, такая модель позволяет анализировать влияние геометрических параметров дозирующего узла на газовый поток, и соответственно оптимизировать конструкцию натекаателя. Простота и экономичность предложенной модели дают возможность в дальнейшем использовать её для анализа особенностей работы натекаателя в составе системы управления током газоразрядных электронных пушек [7].

Выводы

Полученные теоретические результаты и их экспериментальная верификация позволили создать адекватную физико-топологическую модель системы напуска газа, которая связывает геометрию дозирующего узла натекаателя с его эксплуатационными характеристиками. Для предложенной математической модели дозирующего узла натекаателя определены эмпирические коэффициенты зависящие от геометрических размеров, что позволило повысить точность расчетов. С использованием разработанной модели проведен анализ рабочих характеристик натекаателя.

Разработанная математическая модель системы напуска газа может быть использована для анализа особенностей работы натекаателя в составе системы управления током газоразрядных электронных пушек с целью согласования параметров натекаателя с параметрами системы управления.

Литература

1. *Денбновецкий С.В.*, Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники»*. – 2005. – Часть 2. – С. 84–87.
2. *Мельник И.В.*, Тугай Б.А., Тугай С.Б. Повышение стабильности работы электромагнитного натекаателя в системе автоматического управления током газоразрядной пушки // *Электроника и связь*. – 2002. – № 14. – С. 172–175.
3. *Пипко А.И.*, Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.
4. *Гейнце В.* Введение в вакуумную технику: В 2 т. – М. –Л.: Госэнергоиздат, 1960. – Т. 1. Физические основы вакуумной техники. – 511 с.
5. *Тягунов Г.А.* Основы расчета вакуумных систем. – М. –Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 148 с.
6. *Васильев В.П.* Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
7. *Денбновецкий С.В.*, Кубрак А.И., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Моделирование системы автоматического управления током газоразрядной электронной пушки // *Электроника и связь*. – 2002. – № 11. – С. 51–54.