

## К ВОПРОСУ О РАССЕЙАНИИ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ НА МОЛЕКУЛАХ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА В ЭВП СВЧ О-ТИПА

Д.К. Черченко

cherchenko.dk@toriy.ru

Д.А. Комаров

komarov.da@toriy.ru

Е.П. Якушкин

АО «НПП «Торий», Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрено решение задачи о рассеянии интенсивного сфокусированного электронного потока на молекулах остаточного газа в электровакуумных приборах СВЧ О-типа, пригодное для расчетов при любых наборах входных параметров системы. Приведены результаты численного моделирования процессов рассеяния пучка электронов для мощного непрерывного клистрона КУ-329Б, используемого в системах спутниковой связи, а также результаты масс-спектрометрического исследования данного прибора, анализ которых позволил определить набор входных параметров для расчета. Полученные значения среднеквадратического отклонения граничного электрона проверены путем экспериментальных исследований клистрона на стендах термовакуумной обработки и динамических испытаний. Выявлены причины нестабильности клистрона КУ-329Б, характеризующиеся эффектом срыва режимов работы в процессе динамических испытаний, и, как следствие, необходимость введения критерия оценки требуемого в вакуумном объеме прибора уровня давления с точки зрения максимально допустимого рассеяния электронного потока. Соблюдение требований данного критерия важно для мощных приборов, для которых недопустимы даже минимальные значения токооседания на внутренних поверхностях канала транспортировки. С помощью данного критерия рассчитано допустимое значение давления в объеме клистрона КУ-329Б. Проведена модернизация технологии его термовакуумной обработки, что позволило существенно сократить общее время изготовления

### Ключевые слова

*Клистрон, рассеяние, ЭВП СВЧ, масс-спектрометрия, электронный поток*

Поступила 11.12.2023

Принята 16.02.2024

© Автор(ы), 2024

**Введение.** Непрерывное совершенствование электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ О-типа в направлении повышения долговечности и стабильности их работы является ключевой и приоритетной задачей разработок и исследований в данной области. При этом под стабильностью следует понимать отсутствие (допустимое число) срабатываний системы блокировки аппаратуры вследствие возникновения пробойных явлений в вакуумном объеме ЭВП при эксплуатации.

Немаловажное значение для обеспечения долговечности и стабильности работы ЭВП СВЧ имеет состояние остаточного газа, находящегося в вакуумном объеме прибора (состав, парциальные давления) и адсорбированного на его внутренней поверхности (состав, количество) [1, 2]. Поскольку приборы О-типа при работе в статическом и динамическом режимах характеризуются интенсивной бомбардировкой коллектора и пространства взаимодействия электронным потоком (например, для сверхмощных многолучевых клистронов с фокусировкой постоянными магнитами статическое токопрохождение составляет порядка 90 %, а динамическое может уменьшаться до 45...50 %), то при недостаточной обезгаженности приповерхностных слоев материалов прибора наблюдаются интенсивные десорбционные процессы и, как следствие, резкое увеличение давления в вакуумном объеме [3]. Несмотря на то что подобные скачки давления могут быть достаточно быстро скомпенсированы встроенными в прибор средствами откачки, они ввиду малого (порядка наносекунд) времени протекания электродинамических процессов успевают оказать серьезное негативное влияние на электронный поток [4]. Одно из возможных физических явлений, возникающих при взаимодействии заряженных пучков с нейтральными частицами, представляет собой явление рассеяния [5, 6], приводящее к дополнительному увеличению радиуса электронного потока [7]. При этом возможна инициализация лавинообразного процесса вакуумной неустойчивости, что может привести к выходу прибора из строя [1].

*Цель настоящей работы* — определение зависимости среднеквадратического отклонения траектории движения электронов от давления в приборе и его параметров, апробация зависимости на реальном изделии путем численного моделирования и экспериментального исследования. Данная задача в подобной постановке в электронике СВЧ ранее не рассматривалась. В связи с этим критерия оценки требуемого в приборе уровня вакуума с точки зрения максимально допустимого уровня рассеяния электронного потока в явном виде не существовало.

**Материалы и методы решения задач, принятые допущения.** Рассеяние сфокусированного пучка электронов — это отклонение траектории

движения отдельных частиц пучка от расчетной траектории вследствие многократного взаимодействия с молекулами остаточного газа. При этом физическую природу данного явления определяют кулоновские силы упругого отталкивания, которые зависят от кинетической энергии рассеиваемых частиц (т. е. от напряжения катода), атомного номера газа-рассеивателя и его молекулярной концентрации [8].

В отличие от понятия длины свободного пробега, используемого в кинетической теории газов [9], в данном случае необходимый уровень вакуума в приборе определен не возможностью преодолеть некоторое фиксированное расстояние вдоль оси прибора, а отсутствием возмущения траектории движения заряженной частицы.

При расчетах приняты следующие допущения.

1. Остаточный газ является идеальным.
2. Сечение ионизации молекул остаточного газа бесконечно малое для энергий электронного потока ЭВП СВЧ.
3. Температура внутренних поверхностей прибора постоянна и равна 293 К.
4. Значение индукции магнитного поля постоянно.
5. Плотность тока электронного потока постоянна.

Второй закон Ньютона для электрона [10, 11] можно записать так:

$$m\bar{a} = \bar{F}_e + \bar{F}_m + \bar{A},$$

где  $m$  — масса электрона;  $\bar{a}$  — ускорение электрона;  $\bar{F}_e$  — сила электрического поля;  $\bar{F}_m$  — сила магнитного поля;  $\bar{A}$  — случайная сила, характеризующая взаимодействие с молекулами остаточного газа [10].

Траектория движения электронов в постоянном магнитном поле имеет вид спирали с постоянным шагом [12], что позволяет не рассматривать продольное движение вдоль оси прибора, а ограничиться только движением в радиальной плоскости:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m} E_x + \frac{e}{m} \left( \frac{dy}{dt} B_z - \frac{dz}{dt} B_y \right) + A_x(t);$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{e}{m} E_y + \frac{e}{m} \left( \frac{dz}{dt} B_x - \frac{dx}{dt} B_z \right) + A_y(t),$$

где  $x$  и  $y$  — две взаимно перпендикулярные оси, лежащие в плоскости, которая перпендикулярна оси прибора;  $z$  — направление вдоль оси прибора;  $e$  — заряд электрона;  $E_x, E_y, B_x, B_y, B_z$  — проекции на координатные оси векторов напряженности и индукции электрического и магнитно-

го полей соответственно;  $A_x(t)$ ,  $A_y(t)$  — составляющие случайных сил, характеризующих влияние столкновений с молекулами остаточного газа.

Составляющие индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  вдоль оси равны нулю, поэтому обозначим  $B_z = B$ . Тогда уравнения принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{e}{m} E_x + \frac{e}{m} \frac{dy}{dt} B + A_x(t); \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{e}{m} E_y - \frac{e}{m} \frac{dx}{dt} B + A_y(t).\end{aligned}$$

Учитывая, что  $\omega = \frac{e}{m} B$  — циклотронная частота, и принимая

$$k = 2\pi \frac{ej}{m\nu\sqrt{4\pi\epsilon_0}},$$

где  $j$  — плотность тока;  $\nu$  — скорость электрона вдоль оси прибора;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная, уравнения радиального движения электрона можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \omega\dot{y} + A_x(t) + kx; \\ \ddot{y} &= -\omega\dot{x} + A_y(t) + ky;\end{aligned}\tag{1}$$

здесь  $kx$ ,  $ky$  — составляющие кулоновского поля расталкивания в электронном потоке.

Отметим, что с точки зрения кулоновского поля рассматривается возмущение траектории граничного электрона.

Для решения уравнений (1) используем аппарат операционного исчисления. Выполним преобразование Лапласа функций действительного переменного [13]:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt,\tag{2}$$

где  $s$  — комплексная переменная.

Тогда изображения производных примут вид:

$$\begin{aligned}\int_0^{\infty} \dot{f}(t) e^{-st} dt &= sF(s) - f(0); \\ \int_0^{\infty} \ddot{f}(t) e^{-st} dt &= s^2F(s) - sf(0) - \dot{f}(0).\end{aligned}\tag{3}$$

Далее большими буквами будем обозначать соответствующие функции.

Подставляя (3) в систему (1), получаем систему алгебраических уравнений в пространстве изображений:

$$\begin{aligned}(s^2 - k)X(s) - \omega s Y(s) &= A_1(s); \\ \omega s X(s) + (s^2 - k)Y(s) &= A_2(s),\end{aligned}\tag{4}$$

где

$$\begin{aligned}A_1(s) &= A_x(s) + \dot{x}(0) + sx(0) - \omega y(0); \\ A_2(s) &= A_y(s) + \dot{y}(0) + sy(0) + \omega x(0).\end{aligned}\tag{5}$$

В силу равнозначности координат при движении по окружности достаточно рассмотреть только одну составляющую. Решая (4) методом Крамера для составляющей  $X(s)$ , получаем выражение

$$X(s) = \frac{A_1(s)(s^2 - k) + A_2(s)\omega s}{(s^2 - k)^2 + \omega^2 s^2}.\tag{6}$$

В соответствии с (5) решение (6) зависит от начальной скорости электрона и его начального положения в плоскости  $XY$ . Рассмотрим изменение положения частицы по координате  $X$ . Используя свойство линейности [13], определим изменение координаты  $X$  относительно момента времени, равного нулю, в пространстве изображений:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X(s) - X_0(s), \\ \Delta X &= \frac{A_x(s)(s^2 - k) + A_y(s)\omega s}{(s^2 - k)^2 + \omega^2 s^2} = \frac{F(s)}{H(s)}.\end{aligned}\tag{7}$$

Выражение (7) является отношением полиномов. Для нахождения оригинала достаточно применить теорему разложения [13]:

$$\Delta X = \sum_i \frac{F(s_i)}{H(s_i)} e^{s_i t}.$$

Решение получим в виде

$$\Delta X = \sum_{i=1}^4 \frac{A_x(s_i)(s_i^2 - k) + A_y(s_i)\omega s_i}{(s_i^2 - k) \cdot 4s_i + 2\omega^2 s_i} e^{s_i t},$$

где  $s_i$  — полюса решения (7), число которых по основной теореме алгебры равно четырём:

$$s_1 = -s_2 = i \left( \frac{\omega}{2} + \sqrt{\frac{\omega^2}{4} - k} \right);$$

$$s_3 = -s_4 = i \left( \frac{\omega}{2} - \sqrt{\frac{\omega^2}{4} - k} \right).$$

Используя определение (2) для случайных составляющих силы и внося под знак интеграла постоянные множители, окончательное выражение для смещения электрона по оси  $X$  можно представить так:

$$\Delta X = \int_0^{\infty} A_x(\tau) \sum_{i=1}^4 \left( \frac{(s_i^2 - k)}{\left( (s_i^2 - k) + \omega^2/2 \right) \cdot 4s_i} e^{s_i(t-\tau)} \right) d\tau +$$

$$+ \int_0^{\infty} A_y(\tau) \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\omega}{\left( (s_i^2 - k) + \omega^2/2 \right) \cdot 4} e^{s_i(t-\tau)} \right) d\tau,$$

где  $\tau$  — определенный момент времени.

Интегралы, стоящие в правой части данного равенства, представляют собой независимые случайные величины, поэтому, следуя [11], определяем

$$\Delta \bar{X}^2 = \bar{J}_1^2 + \bar{J}_2^2,$$

где

$$J_1 = \int_0^{\infty} A_x(\tau) \psi_1(x) d\tau;$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} A_y(\tau) \psi_2(x) d\tau. \tag{8}$$

Функции  $\psi_{1,2}$  определены как

$$\psi_1(x) = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{(s_i^2 - k)}{\left( (s_i^2 - k) + \omega^2/2 \right) \cdot 4s_i} e^{s_i x} \right);$$

$$\psi_2(x) = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\omega}{\left( (s_i^2 - k) + \omega^2/2 \right) \cdot 4} e^{s_i x} \right),$$

где  $x = t - \tau$ .

Интегралы могут быть заменены суммами Дарбу. С учетом теоремы о среднем значении выражение (8) возможно приближенно представить в виде:

$$J_1 = \sum_{k=0}^M \psi_1(\tau_k - t) \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} A_x(\tau) d\tau,$$

где индекс  $k$  пробегает значения сумм Дарбу до  $M$ , а  $t = \tau_M$ .

Интегралы  $\int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} A_x(\tau) d\tau$  есть независимые случайные величины, поэтому можно записать следующее выражение:

$$\bar{J}_1^2 = \sum_{k=0}^M \psi_1^2(\tau_k - t) \overline{\left[ \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} A_x(\tau) d\tau \right]^2}. \quad (9)$$

Согласно [11], случайные составляющие сил не связаны с наличием магнитного поля, поэтому для вычисления среднего квадрата интеграла (9) получим:

$$\overline{\left[ \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} A_x(\tau) d\tau \right]^2} = \Delta \bar{x}_k^2.$$

Следуя данным из [11], запишем

$$\Delta \bar{x}_k^2 = \frac{1}{2} v^2 \bar{\theta}^2 = \frac{v^2}{2} \frac{8\pi N v \Delta \tau Z^2 e^4}{m^2 v^4} \ln \left( \frac{a_0 m v^2}{2Z^{4/3} e^2} \right),$$

где  $v$  — скорость пучка;  $\theta$  — угол рассеяния;  $N$  — число атомов газа в кубическом метре;  $\Delta \tau$  — интервал времени;  $Z$  — заряд ядра данного атома;  $a_0 = 0,53 \cdot 10^{-10}$  м — боровский радиус.

В результате выражение среднеквадратического отклонения траектории движения электрона примет следующий вид:

$$\Delta \bar{X} = \sqrt{\frac{4\pi N Z^2 e^4}{m^2} \int_0^t (\psi_1^2(\tau - t) + \psi_2^2(\tau - t)) \frac{1}{V} \ln \left( \frac{a_0 m V^2}{2Z^{4/3} e^2} \right) d\tau}. \quad (10)$$

Согласно работе [11], уравнение (10) решено аналитически в асимптотическом приближении, существенно нарушающем общность рассмотрения процесса рассеяния и пригодном только для случая малых значений микропервеанса и энергий электронного потока более 0,5 МэВ. В настоящей работе решение уравнения (10) получено прямым численным моделированием [14], пригодным для любого набора параметров системы, что позволяет проводить анализ реальных приборов в полном объеме.

**Результаты.** Для экспериментального анализа процесса рассеяния электронов на молекулах остаточного газа выбран мощный клистрон непрерывного действия КУ-329Б, используемый в системах спутниковой связи. Технические характеристики прибора приведены ниже.

#### Технические характеристики клистрона КУ-329Б

Мощность в электронном потоке, кВт .....	240
Напряжение катода, кВ .....	35
Индукция магнитного поля, Тл .....	0,1
Плотность тока электронного потока, А/м <sup>2</sup> ....	$6,7 \cdot 10^5$
Диапазон частот.....	X
Тип фокусировки .....	Постоянное магнитное поле

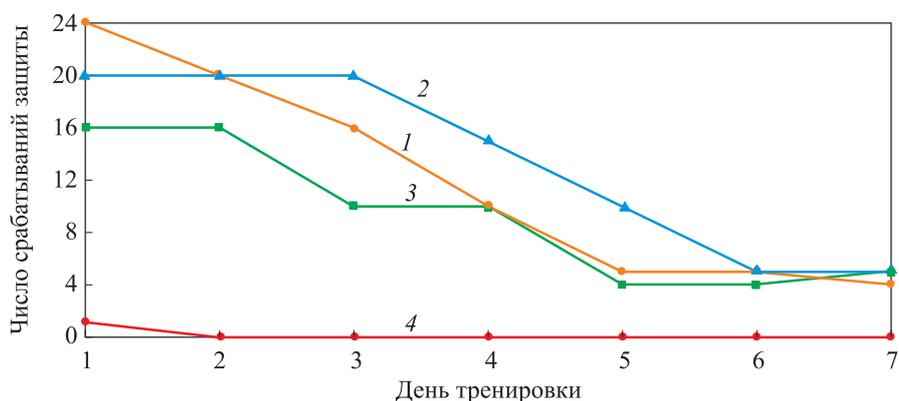
Ввиду высокой мощности в электронном потоке, даже минимальное токооседание на внутренних поверхностях резонаторного блока недопустимо для подобных приборов, поскольку плотность мощности в таком случае имеет значения, достаточные для проплавления канала за малый промежуток времени [15].

Важным фактором, повлиявшим на выбор прибора, является обнаруженный эффект срывов режима работы клистрона КУ-329Б в процессе динамических испытаний [16], проявляющийся в срабатывании защиты по превышению тока встроенного в прибор электроразрядного насоса (ЭРН), что свидетельствует о резком повышении давления в вакуумном объеме прибора [17, 18] в момент срабатывания защиты по току резонаторного блока. Число данных срабатываний аварийной защиты фиксировалось счетчиком. Полученные экспериментальные зависимости числа срабатываний аварийной защиты (аварийных отключений) от дня тренировки для разных уровней мощности электронного потока прибора приведены на рис. 1.

Отметим, что время наработки изделия составляло 7 ч ежедневно. Значение тока аварийного отключения ЭРН равно 10 мА. Длительность аварийного отключения не превышала 40 мс (т. е. считаем, что мгновенно). После отключения входного сигнала и высокого напряжения в конце испытаний клистрон КУ-329Б выдерживался не менее часа под откачкой ЭРН так, что ток при поданном напряжении накала катода к концу процесса откачки не превышал 10 мкА. Температура корпуса в течение испытаний не превышала 30 °С.

Учитывая, что при любом уровне выходной мощности токопрохождение в клистроне КУ-329Б в статическом режиме составляет не менее 99 % и в пределах погрешности измерения не зависит от значения выходной

мощности, главным предположением о причине нестабильности поведения клистрона является процесс интенсивной десорбции газа с внутренней поверхности коллектора, вызванный оседанием на нее электронного потока. Выделившийся под действием электронной бомбардировки газ приводит к резкому увеличению интенсивности рассеяния, что влечет за собой образование лавинообразного процесса вакуумной неустойчивости в силу увеличения токооседания на поверхности резонаторного блока.



**Рис. 1.** Зависимости числа аварийных срабатываний защиты от дня тренировки для различных мощностей в электронном потоке:

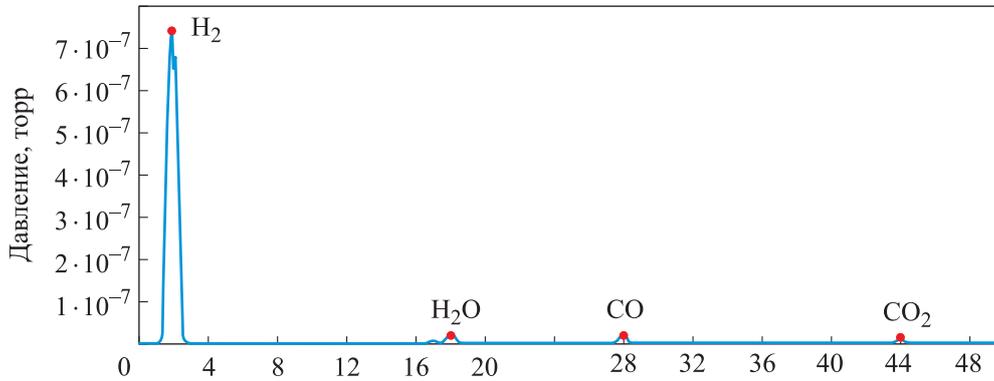
1–4 — 135, 180, 200, 220 кВт соответственно

При расчетах (10) учитывалось влияние следующих газов: водорода, паров воды, оксида и диоксида углерода. Выбор данных компонентов обусловлен составом остаточной среды по окончании процесса термовакуумной обработки, полученным по экспериментальным данным масс-спектрометрии изделия [19] (рис. 2).

Отметим, что ввиду статистической независимости влияния различных газов на рассеяние электронного потока общее их влияние можно вычислить, суммируя соответствующие частные воздействия.

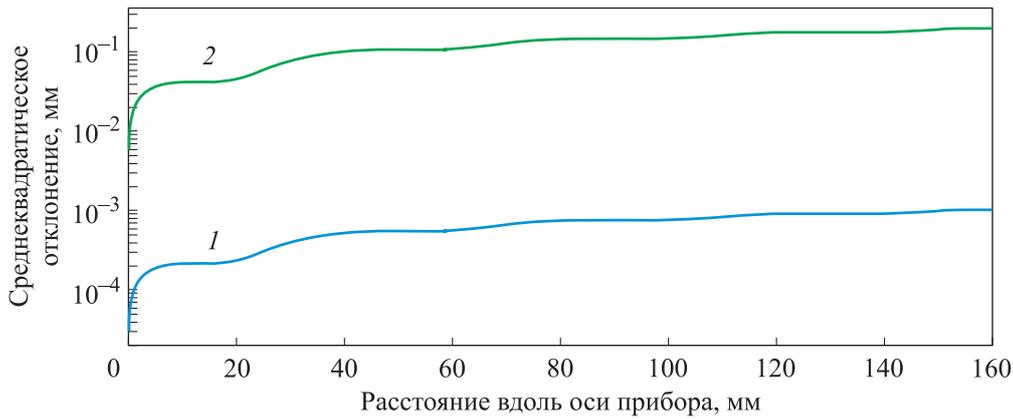
Принимая допущение, что соотношения парциальных давлений остаточных газов после термовакуумной обработки и при десорбционных процессах, вызванных электронной бомбардировкой, неизменны, рассчитываем среднеквадратическое отклонение для полученных условий. Результаты приведены на рис. 3.

Отметим, что при расчетах временной шаг выбирали таким образом, чтобы при уменьшении его в 10 раз результаты вычислений не отличались в пределах выбранной точности с невязкой 0,5 %: при временном интервале расчета от 0 до  $10^{-6}$  с  $\Delta t = 10^{-14}$  с.



**Рис. 2.** Масс-спектр остаточной среды клистрона КУ-329Б после термовакuumной обработки:

$$p_{\text{H}_2} = 7,41 \cdot 10^{-7}; p_{\text{H}_2\text{O}} = 1,71 \cdot 10^{-8}; p_{\text{CO}} = 1,68 \cdot 10^{-8}; p_{\text{CO}_2} = 6,52 \cdot 10^{-9} \text{ торр}$$

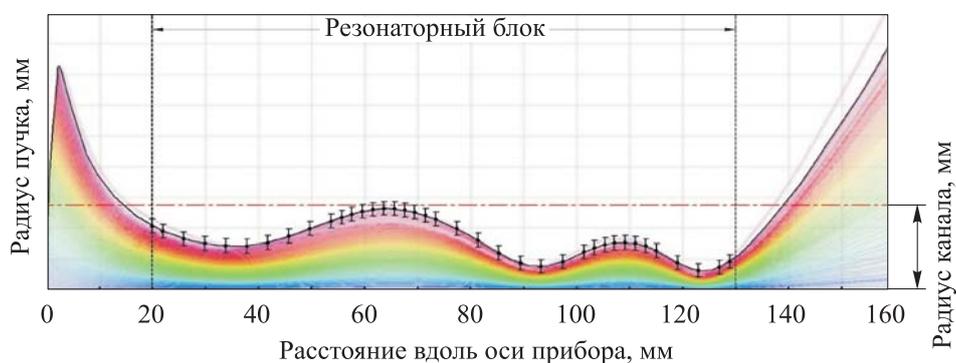


**Рис. 3.** Зависимости среднеквадратического отклонения траектории движения электрона от пройденного расстояния вдоль оси прибора:

1 — после термовакuumной обработки; 2 — при динамических испытаниях;  
 $p_{\text{H}_2} = 2,79 \cdot 10^{-2}; p_{\text{H}_2\text{O}} = 6,45 \cdot 10^{-4}; p_{\text{CO}} = 6,34 \cdot 10^{-4}; p_{\text{CO}_2} = 2,46 \cdot 10^{-4} \text{ торр}$

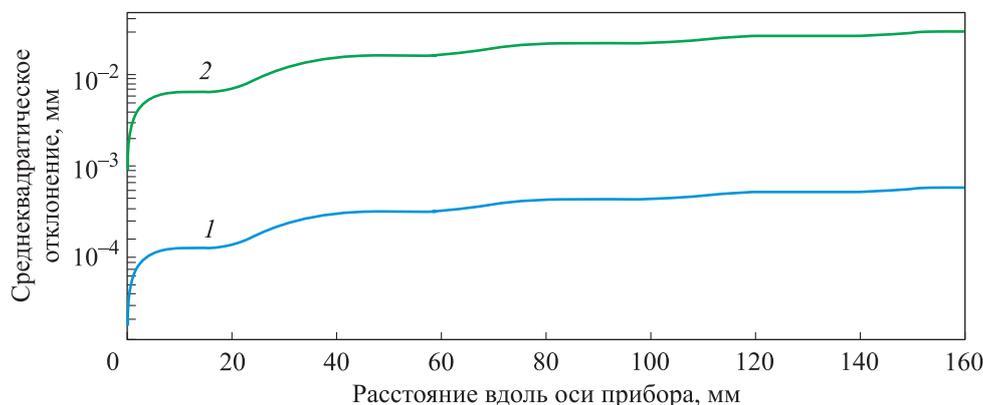
Флуктуация траектории граничного электрона от расчетной, полученной двумерным строгим численным моделированием [20], приведена на рис. 4. Анализ результата расчета позволяет наглядно оценить степень влияния рассеяния на величину токооседания: в данном случае более половины рассеянных электронов достигают поверхности резонаторного блока на длине  $\sim 10$  мм. Такая ситуация является недопустимой для клистрона КУ-329Б.

Необходимо определить такое давление после термовакuumной обработки, чтобы уровень рассеяния не превышал допустимого. Другими словами, траектория граничного электрона с учетом среднеквадрати-



**Рис. 4.** Зависимость радиуса электронного пучка с учетом отклонения траектории граничного электрона (при давлении, полученном на этапе динамических испытаний) от пройденного расстояния вдоль оси прибора

ческого отклонения не должна пересекать радиус канала (в рамках работы принято условие, что полученное значение не должно превышать 0,5 зазора между максимумом огибающей и радиусом канала). Результаты решения для данных условий приведены на рис. 5.



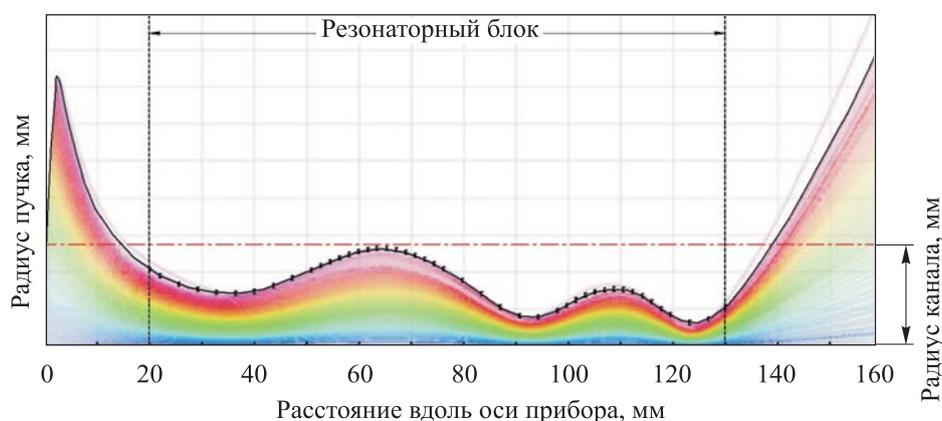
**Рис. 5.** Зависимости допустимого расчетного среднеквадратического отклонения траектории электрона от пройденного расстояния вдоль оси прибора:

1 — после термовакуумной обработки; 2 — при динамических испытаниях;  
 $p_{\text{H}_2} = 2 \cdot 10^{-4}$ ;  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot 10^{-5}$ ;  $p_{\text{CO}} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ ;  $p_{\text{CO}_2} = 5 \cdot 10^{-6}$ , торр

Траектория движения граничного электрона с учетом рассчитанных значений флуктуации приведена на рис. 6. Результат удовлетворяет заданным условиям.

В соответствии с проведенным расчетом путем экстраполяции экспериментальных графиков парциальных давлений, соответствующих суще-

ствующей технологии термовакuumной обработки, получены новые значения длительности выдержки мощного непрерывного клистрона КУ-329Б при максимально допустимой температуре обработки ( $\sim 550$  °С) для достижения расчетных значений давления. Экспериментальная зависимость числа срабатываний аварийной защиты от дня тренировки для различных мощностей электронного потока для новой технологии термовакuumной обработки приведена на рис. 1 (кривая 4). В результате динамических испытаний зафиксировано только одно срабатывание в первый день тренировки при максимальном значении мощности.



**Рис. 6.** Зависимость радиуса электронного пучка с учетом среднеквадратического отклонения траектории движения граничного электрона (при рассчитанном давлении) от пройденного расстояния вдоль оси прибора

**Заключение.** Разработан численный алгоритм решения уравнения рассеяния сфокусированного электронного потока на молекулах остаточного газа. Проведено численное моделирование процессов рассеяния на примере мощного непрерывного клистрона КУ-329Б, что в совокупности с экспериментальными данными позволило провести анализ причин его нестабильности. Полученные результаты позволили существенно улучшить технологию изготовления данного прибора: несмотря на увеличение на 12 ч выдержки, общая продолжительность обработки уменьшилась на шесть дней за счет существенного сокращения этапа динамических испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Глазков А.А., Саксаганский Г.Л. Вакуум электрофизических установок и комплексов. М., Энергоатомиздат, 1985.

- [2] Черепнин Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М., Советское радио, 1973.
- [3] Комаров Д.А., Парамонов Ю.Н., Саблин В.М. и др. Особенности откачки электровакуумных приборов СВЧ X-диапазона длин волн. *Матер. XXIX науч.-техн. конф. «Вакуумная наука и техника»*, 2022, с. 85–88. EDN: FLAFFN
- [4] Reiser M. Theory and design of charged particle beams. New York, Wiley, 2008.
- [5] Jackson D. Classical electrodynamics. New York, Wiley, 1962.
- [6] Moller S.P. Beam-residual gas interactions. In: *CAS — CERN accelerator school: Vacuum technology*. Geneva, 1999, pp. 155–164.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-1999-005.155>
- [7] Möhl D. Sources of emittance growth. In: *CAS — CERN accelerator school: Vacuum technology*. Geneva, 2006, pp. 245–270.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2006-002.245>
- [8] Саксаганский Г.Л. Вакуумная техника и технология электрофизического аппаратостроения. М., Заочный институт ЦП ВНТО приборостроителей, 1989.
- [9] Тимирязев А.К. Кинетическая теория материи. М., УЧПЕДГИЗ, 1956.
- [10] Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии. М., ГИИЛ, 1947.
- [11] Ахиезер А.И., Любарский Г.Я. О фокусировке электронным потоком в протонном ускорителе. В кн.: *Теория и расчет линейных ускорителей*. М., ГИЛАНТ, 1962, с. 131–146.
- [12] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., Советское радио, 1966.
- [13] Свешников А.Г., Тихонов А.Н. Теория функций комплексной переменной. М., Наука, 1974.
- [14] Гутер Р.С., Резниковский П.Т. Программирование и вычислительная математика. Вып. 2. М., Наука, 1971.
- [15] Комаров Д.А., Якушкин Е.П., Парамонов Ю.Н. и др. Сверхмощный клистрон X-диапазона длин волн с выходной импульсной мощностью не менее 3 МВт: проектирование и эксперимент. *Радиотехника и электроника*, 2023, т. 68, № 11, с. 1108–1116. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0033849423080065>
- [16] Комаров Д.А., Масленников С.П., Якушкин Е.П. и др. Влияние внешних электрических цепей на статический и динамический режим работы многолучевых коллекторов мощных клистронов. *Радиотехника и электроника*, 2020, т. 65, № 3, с. 308–312. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0033849420030080>
- [17] Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. М., Энергоатомиздат, 1988.
- [18] Попов В.Ф. Магниторазрядные насосы. М., Энергия, 1970.
- [19] Monchamp P., Andrade-Cetto L., Zhang J.Y., et al. Signal processing methods for mass spectrometry. In: *System bioinformatics*. London, Artech House Publ., 2007, pp. 101–124.
- [20] Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. Л., Изд-во АН СССР, 1963.

**Черченко Дмитрий Константинович** — ведущий инженер АО «НПП «Торий» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Обручева, д. 52).

**Комаров Дмитрий Александрович** — д-р техн. наук, главный специалист АО «НПП «Торий» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Обручева, д. 52).

**Якушкин Евгений Павлович** — канд. техн. наук, начальник отдела АО «НПП «Торий» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Обручева, д. 52).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Черченко Д.К., Комаров Д.А., Якушкин Е.П. К вопросу о рассеянии интенсивных электронных потоков на молекулах остаточного газа в ЭВП СВЧ О-типа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 3 (148), с. 59–74.

EDN: IZAMCX

**ON THE ISSUE OF THE INTENSE ELECTRON FLOW SCATTERING  
ON RESIDUAL GAS MOLECULES IN THE O-TYPE MICROWAVE EVD**

**D.K. Cherchenko**

cherchenko.dk@toriy.ru

**D.A. Komarov**

komarov.da@toriy.ru

**E.P. Yakushkin**

**JSC RPE “Toriy” , Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper presents solution to the problem of intense focused electron beam scattering on residual gas molecules in the O-type microwave electrovacuum devices (EVD). The solution could be introduced in computation with any set of the system input parameters. The paper provides results of numerical simulation of the electron beam scattering processes for the KU-329B powerful continuous klystron used in the satellite communication systems, as well as results of this device mass-spectrometric study, which analysis makes it possible to determine a set of the computation input parameters. The obtained values of the root-mean-square deviation of the boundary electron were verified by the klystron experimental study on the thermal vacuum treatment and dynamic testing benches. Results of the obtained data analysis revealed causes of the device instability characterized by the effect of the operation modes disruption in dynamic testing. Consequently, the need was identified to introduce a criterion for estimating the pres-

**Keywords**

*Klystron, scattering, microwave EVD, mass spectrometry, electron flow*

sure level required in the device vacuum volume from the point of view of the electron beam maximum permissible scattering. Compliance with this criterion requirements is important in the powerful devices, where even minimum values of current deposition on the transport channel internal surfaces are unacceptable. This criterion was used to compute the pressure permissible value in the KU-329B device volume. Technology of its thermal vacuum treatment was modernized making it possible to significantly reduce the overall manufacture time

Received 11.12.2023

Accepted 16.02.2024

© Author(s), 2024

---

## REFERENCES

- [1] Glazkov A.A., Saksaganskiy G.L. Vakuum elektrofizicheskikh ustanovok i kompleksov [Vacuum of electrophysical installation and complexes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985.
- [2] Cherepnin N.V. Sorbtsionnye yavleniya v vakuumnoy tekhnike [Sorption phenomena in vacuum technology]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973.
- [3] Komarov D.A., Paramonov Yu.N., Sablin V.M., et al. [Peculiarities of pumping of electric vacuum X-band microwave devices]. *Vakuumnaya nauka i tekhnika. Mater. XXIX nauch.-tekh. konf.* [Vacuum Science and Technique. Proc. XXIX Sc.-Tech. Conf.]. Moscow, Elektrovakuumnye tekhnologii Publ., 2022, pp. 85–88 (in Russ.).  
EDN: FLAFFN
- [4] Reiser M. Theory and design of charged particle beams. New York, Wiley, 2008.
- [5] Jackson D. Classical electrodynamics. New York, Wiley, 1962.
- [6] Moller S.P. Beam-residual gas interactions. In: *CAS — CERN accelerator school: Vacuum technology*. Geneva, 1999, pp. 155–164.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-1999-005.155>
- [7] Möhl D. Sources of emittance growth. In: *CAS — CERN accelerator school: Vacuum technology*. Geneva, 2006, pp. 245–270.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2006-002.245>
- [8] Saksaganskiy G.L. Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya elektrofizicheskogo apparatostroeniya [Vacuum technology and technology of electrophysical apparatus engineering]. Moscow, Zaochnyy institut TsP VNTO priborostroiteley Publ., 1989.
- [9] Timiryazev A.K. Kineticheskaya teoriya materii [Kinetic theory of matter]. Moscow, UCHPEDGIZ Publ., 1956.
- [10] Chandrasekhar S. Stokhasticheskie problemy v fizike i astronomii [Stochastic, statistical, and hydromagnetic problems in physics and astronomy], Moscow, GIIL Publ., 1947.
- [11] Akhiezer A.I., Lyubarskiy G.Ya. O fokusirovke elektronnyim potokom v protonnom uskoritele [On focusing by electron flow in proton accelerator]. V kn.: *Teoriya i raschet*

*lineynykh uskoriteley* [In: Theory and calculation of linear accelerators]. Moscow, GILANT Publ., 1962, pp. 131–146 (in Russ.).

[12] Alyamovskiy I.V. Elektronnye puchki i elektronnye pushki [Electron beams and electron guns]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966.

[13] Sveshnikov A.G., Tikhonov A.N. Teoriya funktsiy kompleksnoy peremennoy [Theory of functions of a complex variable]. Moscow, Nauka Publ., 1974.

[14] Guter R.S., Reznikovskiy P.T. Programmirovaniye i vychislitel'naya matematika. Vyp. 2 [Programming and computational mathematics. Iss. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1971.

[15] Komarov D.A., Yakushkin E.P., Paramonov Yu.N., et al. Superpower X-band klystron with an output pulse power of at least 3 MW: design and experiment. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2023, vol. 68, no. 11, pp. 1312–1320.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226923080065>

[16] Komarov D.A., Maslennikov S.P., Yakushkin E.P., et al. Influence of external electric circuits on the static and dynamic mode of operation of multipath collectors of powerful klystrons. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 306–310.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064226920030080>

[17] Saksaganskiy G.L. Elektrofizicheskie vakuumnnye nasosy [Electrophysical vacuum pumps]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988.

[18] Popov V.F. Magnitorazryadnye nasosy [Magnetic-discharge pumps]. Moscow, Energiya Publ., 1970.

[19] Monchamp P., Andrade-Cetto L., Zhang J.Y., et al. Signal processing methods for mass spectrometry. In: *System bioinformatics*. London, Artech House Publ., 2007, pp. 101–124.

[20] Kelman V.M., Yavor S.Ya. Elektronnaya optika [Electron optics]. Leningrad, AN SSSR Publ., 1963.

**Cherchenko D.K.** — Lead Engineer, JSC RPE “Toriy” (Obrucheva ul. 52, Moscow, 117342 Russian Federation).

**Komarov D.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Chief Specialist, JSC RPE “Toriy” (Obrucheva ul. 52, Moscow, 117342 Russian Federation).

**Yakushkin E.P.** — Cand. Sc. (Eng.), Head Department, JSC RPE “Toriy” (Obrucheva ul. 52, Moscow, 117342 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Cherchenko D.K., Komarov D.A., Yakushkin E.P. On the issue of the intense electron flow scattering on residual gas molecules in the O-type microwave EVD. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 3 (148), pp. 59–74 (in Russ.). EDN: IZAMCX