

УДК 531.782.082

## ПОВЫШЕНИЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ОКНО ДЛЯ ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Л. Н. Орликов, Н. Л. Орликов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск

Выполнен анализ работы газодинамического окна в виде откачиваемой камеры с отверстиями диаметром 1 мм для вывода электронного пучка из вакуума (10 Па) в атмосферу. Увеличение перепада давления достигается за счет эжектирующего эффекта, возникающего при обтекании газом элемента газодинамического окна, содержащего дренажные отверстия в стенке. Приводится методика расчета площади дренажных отверстий.

Для вывода электронных пучков из вакуума в атмосферу применяются газодинамические окна [1–4] в виде камер с автономной откачкой газа и элементами с отверстиями для вывода пучка. Однако для работы таких устройств требуется большая мощность вакуумных насосов для поддержания перепада давления между источником электронов и камерой с газом (5–10 кВт на 1 мм<sup>2</sup> площади выводного отверстия) [5–7]. Возможный путь решения проблемы вывода пучков заключается в применении газоразрядных источников электронов, работающих на форвакууме [3, 4, 8], а также в использовании газодинамических эффектов для увеличения перепада давления через газодинамическое окно.

На рис. 1 приведена схема источника электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с двухступенчатым газодинамическим окном. Источник состоит из холодного алюминиевого катода и анодов, между которыми равномерно распределен ускоряющий потенциал. При давлении в источнике 1–10 Па на катод подается отрицательный потенциал (до 100 кВ). Между катодом и анодами зажигается высоковольтный тлеющий разряд.

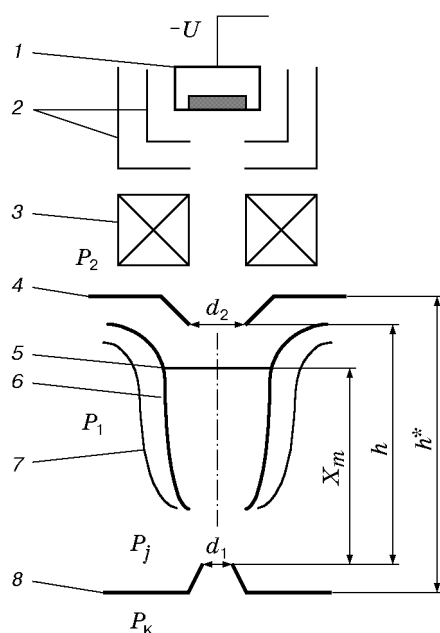


Рис. 1. Схема источника электронов с газодинамическим окном:

1 — катод; 2 — аноды; 3 — магнитная линза; 4, 8 — элементы газодинамического окна с отверстиями диаметром  $d_2$ ,  $d_1$  соответственно; 5 — диск Маха; 6 — висячий скачок уплотнения давления; 7 — граница струи

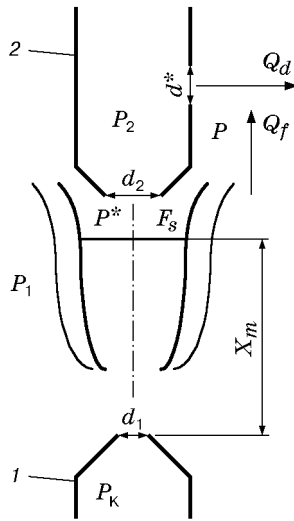


Рис. 2. Схема течения газа в газодинамическом окне с боковыми отверстиями: 1, 2 — элементы с острыми кромками

Ионы из плазмы разряда устремляются на катод. Под действием ионной бомбардировки из катода выбиваются электроны. Электронный пучок с силой тока до 100 мА фокусируется магнитной линзой в отверстиях диаметром  $d_2$  и  $d_1$  элементов газодинамического окна и выводится в камеру с давлением  $P_k$ . Поток газа из рабочей камеры формируется между элементами окна (в первой ступени газодинамического окна) в виде сверхзвуковой струи с диском Маха и всячим скачком уплотнения давления. Перепад давления определяется отношением давления в камере  $P_k$  к давлению во второй ступени газодинамического окна (в источнике электронов)  $P_2$ . Для минимизации потерь электронного пучка в газе важно предельно уменьшить расстояние  $h$  между срезами элементов окна при минимальном давлении в источнике электронов. В ходе экспериментов установлено, что при использовании элементов в виде трубок с острыми кромками это условие выполняется, когда значение  $h$  равно расстоянию  $X_m$  до диска Маха. Значение  $X_m$  определяется выражением [9]

$$X_m = 0,7d_1(kP_j/P_1)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $k$  — показатель адиабаты газа;  $P_j$  — давление на срезе отверстия истечения газа;  $P_1$  — давление между элементами окна.

На рис. 2 представлена схема течения газа в двухступенчатом газодинамическом окне, образованном элементами с острыми кромками. Из анализа полученного в эксперименте распределения давления на поверхности элемента второй ступени окна следует, что давление торможения  $P^*$  на входе в элемент окна в 5–6 раз превышает давление  $P$  на его наружной поверхности. Боковые дренажные отверстия диаметром  $d^*$  в элементе второй ступени окна позволяют отводить часть газа из канала вывода пучка в первую ступень окна за счет разности давлений на стенках элемента. В результате перепад давления на газодинамическом окне увеличивается без увеличения производительности средств откачки.

Для практического применения данного метода необходимо определить площадь боковых отверстий, их положение и количество удаляемого газа. Анализ системы удобно проводить на основе общего уравнения эжекции [9]

$$n = \frac{1}{Na\theta^{0,5}} \frac{q(\lambda)_d}{q(\lambda)_f}, \quad (2)$$

где коэффициент эжекции  $n = Q_d/Q_f$  — отношение расходов эжектируемого и эжектирующего потоков;  $N$  — перепад давления на боковом отверстии;  $a$  — геометрический параметр (отношение площади боковых отверстий  $F^*$  к площади струи, обтекающей элемент);  $\theta$  — отношение температур эжектируемого и эжектирующего потоков;

$q(\lambda) = [(k+1)/2]^{1/(k-1)} \lambda [1 - (k-1)/(k+1) \lambda^2]^{1/(k-1)}$ ;  $\lambda$  — коэффициент скорости потока (отношение скорости потока к скорости звука в неподвижном газе); индексы  $d$ ,  $f$  соответствуют эжектируемому и эжектирующему потокам газа.

Практические расчеты можно провести в упрощенной постановке, используя одномерную модель истечения сверхзвуковой недорасширенной струи и ее особенности взаимодействия с острым телом.

Для большинства практических устройств перепад давления на каждой ступени окна не превышает два-три порядка. В этом случае внутренний диаметр струи, определенный по диаметру диска Маха, почти в 10 раз превышает диаметр отверстия истечения  $d_1$  [9]. При визуализации газового потока в тлеющем разряде авторами настоящей работы установлено, что при высоте элемента (расстоянии от основания до среза), большей рассчитанной по уравнению (1), и внешнем диаметре элемента, меньшем диаметра диска Маха, обтекание элемента происходит без отхода диска Маха. В этих условиях значительного изменения размеров струи за диском Маха не происходит, и в качестве площади струи вокруг боковых отверстий можно принять площадь струи на уровне диска Маха. Для элемента в виде трубки можно принять, что скорость потока газа на его внешней поверхности достигает скорости звука, а отношение температур потоков по обе стороны бокового отверстия незначительно. Следовательно,  $\lambda = 1$ ,  $q(\lambda)_f = 1$ ,  $\theta = 1$  [9].

Зондирование потока трубкой Пито показывает, что давление торможения  $P^*$  и статическое давление на входе второй ступени окна соизмеримы:  $P^* \approx P_2$ , а давление на внешней боковой поверхности элемента близко к давлению  $P_1$  между элементами:  $P \approx P_1$ . Таким образом, расположение боковых отверстий вблизи среза отверстия  $d_2$  наиболее эффективно.

Уже при отношении давлений на боковой стенке  $P/P^* < 0,528$  истечение газа через боковые отверстия происходит со скоростью звука. На боковом отверстии реализуется звуковой эжектор, для которого возможная степень повышения давления в режиме запирания составляет  $P^*/P_1 = 3,55$  [9]. Соответственно перепад давления на боковом отверстии близок к этой величине ( $N \approx P^*/P_1$ ).

После упрощений уравнение (2) преобразуется к виду  $n = 1/(3,55a)$ . Из результатов экспериментов следует, что это соотношение выполняется в газодинамических окнах с относительно высокими значениями давления в ступенях при соизмеримости площадей боковых отверстий и площади струи ( $a = 1$ ), а также давлений эжектируемого и эжектирующего потоков. Для рассматриваемого двухступенчатого окна необходимо обеспечить минимальное давление в источнике электронов. Это может быть достигнуто при минимальных значениях  $n$  и  $a$ .

Предельно малое значение геометрического параметра может быть определено из анализа потоков при критическом течении газа через отверстия. Эжектирующий поток, формируемый вокруг элемента на входе окна, определяется соотношением, используемым в вакуумной технике [10] для вязкостного режима течения газа:

$$Q_f = 200F_1(P_k - P_1). \quad (3)$$

На входе второй ступени окна поток газа

$$Q_2 = 200F_2(P_1 - P_2) \quad (4)$$

(давления  $P_1$ ,  $P_2$  могут быть определены отношением потока к скорости откачки [10]). Эжектируемый поток газа через боковые отверстия элемента определяется аналогично:

$$Q_d = 200F^*(P^* - P_1). \quad (5)$$

На практике последним членом в скобках в уравнениях (3)–(5) пренебрегают из-за его малости по сравнению с первым членом.

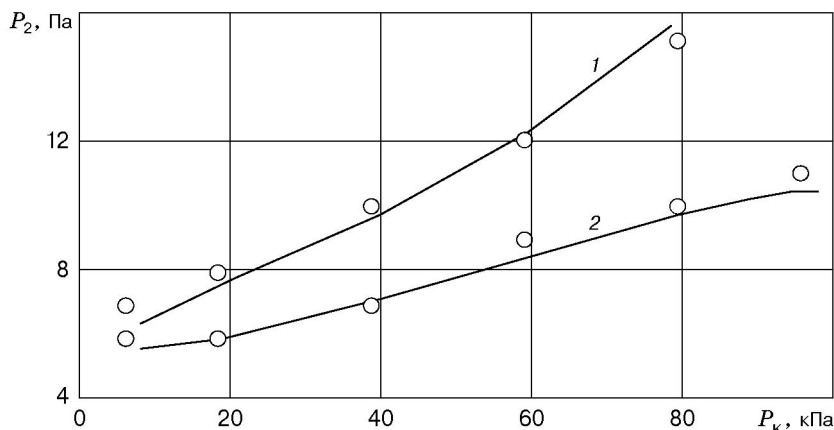


Рис. 3. Зависимость давления в источнике электронов от давления в камере ( $d_1 = d_2 = 1$  мм):

1 — без боковых отверстий; 2 — с пятью боковыми отверстиями диаметром 0,6 мм

Доля потока, отводимого через боковые отверстия, с учетом степени повышения давления ( $P^* \approx 3,55P_1$ ) находится из отношения уравнений (5) и (4):  $Q_d/Q_2 = F^*/F_2 = 0,71$ . Коэффициент эжекции может быть также определен из отношения уравнений (3) и (5):  $n = Q_d/Q_f = F^*/F_s$ , где  $F^*$  — площадь боковых отверстий;  $F_s$  — площадь струи на уровне диска Маха. Для практического использования при диаметре диска Маха, в 10 раз превышающем диаметр отверстия истечения, отношение площади боковых отверстий к площади струи определяется отношением  $a = F^*/F_s \approx 10^{-2}$ .

Экспериментальная проверка эффективности элементов откачки с боковыми отверстиями проводилась с использованием газоразрядного электронного источника с газодинамическим окном [4]. Откачка источника электронов проводилась вакуумным насосом ВН-1 с производительностью  $10 \text{ дм}^3/\text{с}$ , откачка окна — насосом ВН-7 с производительностью  $45 \text{ дм}^3/\text{с}$ . Диаметр выводных отверстий составлял 1 мм. В элементе второй ступени окна размещались 5 отверстий диаметром 0,6 мм. Расстояние между срезами элементов  $h = 9$  мм, расстояние между основаниями элементов  $h^* = 30$  мм.

На рис. 3 представлены зависимости давления в источнике электронов от давления в камере при напряжении 60 кВ и силе тока до 30 мА. Видно, что на окне с боковыми отверстиями достигается меньшее давление в источнике электронов. Установлено, что количество боковых отверстий зависит от режима работы системы. Увеличение площади боковых отверстий приводит к увеличению коэффициента эжекции. Однако это ведет к росту давления эжектирования и уменьшению разности давлений в источнике и области между элементами. Прямые измерения расходов газа показывают, что количество газа, попадающее во вторую ступень окна, в 80–100 раз меньше попадающего в первую ступень. Изменения давления в первой ступени окна за счет притока газа из боковых отверстий не зафиксировано из-за относительно малого изменения количества газа и большой скорости откачки газа из первой ступени окна. Однако во второй ступени окна отведенное количество газа занимает объем во столько раз больший, во сколько раз давление во второй ступени меньше, чем в первой. Поэтому небольшое изменение расхода газа на входе отверстия в элементе второй ступени приводит к значительному изменению давления в источнике электронов.

В итоге использование конструкции с боковыми отверстиями в элементе второй ступени окна позволяет увеличить перепад давления с  $4 \cdot 10^3$  до  $10^4$  и уменьшить необходимую мощность средств откачки с 5 до 1,5 кВт на  $1 \text{ мм}^2$  площади выводного отверстия. При по-

стоянном перепаде давления можно в 2–3 раза увеличить площадь отверстий для вывода пучка без повышения производительности средств откачки.

Авторы выражают благодарность Р. Г. Шарафутдинову и И. М. Васенину за внимание к работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Schumacher B. W.** Dynamic pressures stages for high-pressure/high-vacuum systems // Trans of the 8th Nat. vacuum symp. and 2nd Intern. Congr. a vacuum sci. and technol., Oxford etc., Dec. 1961. Washington: Pergamon Press, 1962. P. 1192–1200.
2. **Голубенко Ю. И., Вейс М. Э., Куксанов Н. К. и др.** Ускорители электронов серии ЭЛВ: состояние, применение, развитие // Радтех-Евразия. 1999. № 1. С. 6–31.
3. **Чикин Е. В., Орликов Л. Н., Минина И. В.** Газоразрядная электронная пушка с газодинамическим окном // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 6. С. 137–139.
4. **Гитт В. Д., Рыльцев П. И., Тихомиров С. И. и др.** Газоразрядная электронная пушка с выводом пучка в газ среднего давления // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 4. С. 169–171.
5. **Shapiro A. H.** Optimum design of pumping system for maintaining vacuum in a chamber open to the atmosphere through an aperture // Vacuum. 1963. V. 13, N 3. P. 83–87.
6. **Pat. 3585349 USA, cl. 219-121.** Non vacuum environmentally controlled electron beam / D. C. Kalbfell. Publ. 15.06.71.
7. **Завьялов М. А., Зверев В. В., Шапиро А. Л.** Методика расчета системы дифференциальной откачки // Приборы и техника эксперимента. 1983. № 4. С. 162–164.
8. **Орликов Л. Н., Чикин Е. В.** О повышении эффективности газодинамического окна для вывода электронных пучков // ПМТФ. 1985. № 2. С. 3–6.
9. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
10. **Вакуумная техника:** Справ. / Под ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М.: Машиностроение, 1985.

*Поступила в редакцию 16/I 2001 г.,  
в окончательном варианте — 3/IV 2001 г.*

---